

# Ciência e Tecnologia

Para o Desenvolvimento  
Ambiental, Cultural  
e Socioeconômico

Xosé Somoza Medina  
(organizador)

VOL II

 EDITORA  
ARTEMIS  
2023

# Ciência e Tecnologia

Para o Desenvolvimento  
Ambiental, Cultural  
e Socioeconômico

Xosé Somoza Medina  
(organizador)

VOL II

 EDITORA  
ARTEMIS  
2023



O conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição Creative Commons Atribuição-Não-Comercial NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0). Direitos para esta edição cedidos à Editora Artemis pelos autores. Permitido o download da obra e o compartilhamento, desde que sejam atribuídos créditos aos autores, e sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

A responsabilidade pelo conteúdo dos artigos e seus dados, em sua forma, correção e confiabilidade é exclusiva dos autores. A Editora Artemis, em seu compromisso de manter e aperfeiçoar a qualidade e confiabilidade dos trabalhos que publica, conduz a avaliação cega pelos pares de todos manuscritos publicados, com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

<b>Editora Chefe</b>	Prof. <sup>a</sup> Dr. <sup>a</sup> Antonella Carvalho de Oliveira
<b>Editora Executiva</b>	M. <sup>a</sup> Viviane Carvalho Mocellin
<b>Direção de Arte</b>	M. <sup>a</sup> Bruna Bejarano
<b>Diagramação</b>	Elisangela Abreu
<b>Organizador</b>	Prof. Dr. Xosé Somoza Medina
<b>Imagem da Capa</b>	peacestock/123RF
<b>Bibliotecário</b>	Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422

#### Conselho Editorial

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Ada Esther Portero Ricol, *Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”*, Cuba  
Prof. Dr. Adalberto de Paula Paranhos, Universidade Federal de Uberlândia  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Amanda Ramalho de Freitas Brito, Universidade Federal da Paraíba  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Ana Clara Monteverde, *Universidad de Buenos Aires*, Argentina  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Ana Júlia Viamonte, Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), Portugal  
Prof. Dr. Ángel Mujica Sánchez, *Universidad Nacional del Altiplano*, Peru  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Angela Ester Mallmann Centenaro, Universidade do Estado de Mato Grosso  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Begoña Blandón González, *Universidad de Sevilla*, Espanha  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Carmen Pimentel, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Catarina Castro, Universidade Nova de Lisboa, Portugal  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Cirila Cervera Delgado, *Universidad de Guanajuato*, México  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Cláudia Neves, Universidade Aberta de Portugal  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Cláudia Padovesi Fonseca, Universidade de Brasília-DF  
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos, Universidade Federal da Grande Dourados  
Prof. Dr. David García-Martul, *Universidad Rey Juan Carlos de Madrid*, Espanha  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Deuzimar Costa Serra, Universidade Estadual do Maranhão  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Dina Maria Martins Ferreira, Universidade Estadual do Ceará  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Edith Luévano-Hipólito, *Universidad Autónoma de Nuevo León*, México  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Eduarda Maria Rocha Teles de Castro Coelho, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Portugal  
Prof. Dr. Eduardo Eugênio Spers, Universidade de São Paulo  
Prof. Dr. Eloi Martins Senhoras, Universidade Federal de Roraima, Brasil  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Elvira Laura Hernández Carballido, *Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo*, México

Prof.<sup>ª</sup> Dr.<sup>ª</sup> Emilas Darlene Carmen Lebus, *Universidad Nacional del Nordeste/ Universidad Tecnológica Nacional, Argentina*  
Prof.<sup>ª</sup> Dr.<sup>ª</sup> Erla Mariela Morales Morgado, *Universidad de Salamanca, Espanha*  
Prof. Dr. Ernesto Cristina, *Universidad de la República, Uruguay*  
Prof. Dr. Ernesto Ramírez-Briones, *Universidad de Guadalajara, México*  
Prof. Dr. Gabriel Díaz Cobos, *Universitat de Barcelona, Espanha*  
Prof.<sup>ª</sup> Dr.<sup>ª</sup> Gabriela Gonçalves, Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), Portugal  
Prof. Dr. Geoffroy Roger Pointer Malpass, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil  
Prof.<sup>ª</sup> Dr.<sup>ª</sup> Gladys Esther Leoz, *Universidad Nacional de San Luis, Argentina*  
Prof.<sup>ª</sup> Dr.<sup>ª</sup> Glória Beatriz Álvarez, *Universidad de Buenos Aires, Argentina*  
Prof. Dr. Gonçalo Poeta Fernandes, Instituto Politécnico da Guarda, Portugal  
Prof. Dr. Gustavo Adolfo Juarez, *Universidad Nacional de Catamarca, Argentina*  
Prof. Dr. Håkan Karlsson, *University of Gothenburg, Suécia*  
Prof.<sup>ª</sup> Dr.<sup>ª</sup> Iara Lúcia Tescarollo Dias, Universidade São Francisco, Brasil  
Prof.<sup>ª</sup> Dr.<sup>ª</sup> Isabel del Rosario Chiyon Carrasco, *Universidad de Piura, Peru*  
Prof.<sup>ª</sup> Dr.<sup>ª</sup> Isabel Yohena, *Universidad de Buenos Aires, Argentina*  
Prof. Dr. Ivan Amaro, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil  
Prof. Dr. Iván Ramon Sánchez Soto, *Universidad del Bío-Bío, Chile*  
Prof.<sup>ª</sup> Dr.<sup>ª</sup> Ivânia Maria Carneiro Vieira, Universidade Federal do Amazonas, Brasil  
Prof. Me. Javier Antonio Alborno, *University of Miami and Miami Dade College, Estados Unidos*  
Prof. Dr. Jesús Montero Martínez, *Universidad de Castilla - La Mancha, Espanha*  
Prof. Dr. João Manuel Pereira Ramalho Serrano, Universidade de Évora, Portugal  
Prof. Dr. Joaquim Júlio Almeida Júnior, UniFIMES - Centro Universitário de Mineiros, Brasil  
Prof. Dr. Jorge Ernesto Bartolucci, *Universidad Nacional Autónoma de México, México*  
Prof. Dr. José Cortez Godinez, Universidad Autónoma de Baja California, México  
Prof. Dr. Juan Carlos Cancino Diaz, Instituto Politécnico Nacional, México  
Prof. Dr. Juan Carlos Mosquera Feijoo, *Universidad Politécnica de Madrid, Espanha*  
Prof. Dr. Juan Diego Parra Valencia, *Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín, Colômbia*  
Prof. Dr. Juan Manuel Sánchez-Yáñez, *Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México*  
Prof. Dr. Júlio César Ribeiro, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Brasil  
Prof. Dr. Leinig Antonio Perazolli, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Brasil  
Prof.<sup>ª</sup> Dr.<sup>ª</sup> Livia do Carmo, Universidade Federal de Goiás, Brasil  
Prof.<sup>ª</sup> Dr.<sup>ª</sup> Luciane Spanhol Bordignon, Universidade de Passo Fundo, Brasil  
Prof. Dr. Luis Fernando González Beltrán, *Universidad Nacional Autónoma de México, México*  
Prof. Dr. Luis Vicente Amador Muñoz, *Universidad Pablo de Olavide, Espanha*  
Prof.<sup>ª</sup> Dr.<sup>ª</sup> Macarena Esteban Ibáñez, *Universidad Pablo de Olavide, Espanha*  
Prof. Dr. Manuel Ramiro Rodríguez, *Universidad Santiago de Compostela, Espanha*  
Prof.<sup>ª</sup> Dr.<sup>ª</sup> Márcia de Souza Luz Freitas, Universidade Federal de Itajubá, Brasil  
Prof. Dr. Marcos Augusto de Lima Nobre, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Brasil  
Prof. Dr. Marcos Vinicius Meiado, Universidade Federal de Sergipe, Brasil  
Prof.<sup>ª</sup> Dr.<sup>ª</sup> Mar Garrido Román, *Universidad de Granada, Espanha*  
Prof.<sup>ª</sup> Dr.<sup>ª</sup> Margarida Márcia Fernandes Lima, Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil  
Prof.<sup>ª</sup> Dr.<sup>ª</sup> Maria Aparecida José de Oliveira, Universidade Federal da Bahia, Brasil  
Prof.<sup>ª</sup> Dr.<sup>ª</sup> Maria Carmen Pastor, *Universitat Jaume I, Espanha*  
Prof.<sup>ª</sup> Dr.<sup>ª</sup> Maria do Céu Caetano, Universidade Nova de Lisboa, Portugal  
Prof.<sup>ª</sup> Dr.<sup>ª</sup> Maria do Socorro Saraiva Pinheiro, Universidade Federal do Maranhão, Brasil  
Prof.<sup>ª</sup> Dr.<sup>ª</sup> Maria Lúcia Pato, Instituto Politécnico de Viseu, Portugal



Prof.ª Dr.ª Maritza González Moreno, *Universidad Tecnológica de La Habana*, Cuba  
Prof.ª Dr.ª Mauriceia Silva de Paula Vieira, Universidade Federal de Lavras, Brasil  
Prof.ª Dr.ª Ninfa María Rosas-García, Centro de Biotecnología Genómica-Instituto Politécnico Nacional, México  
Prof.ª Dr.ª Odara Horta Boscolo, Universidade Federal Fluminense, Brasil  
Prof. Dr. Osbaldo Turpo-Gebera, *Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa*, Peru  
Prof.ª Dr.ª Patrícia Vasconcelos Almeida, Universidade Federal de Lavras, Brasil  
Prof.ª Dr.ª Paula Arcoverde Cavalcanti, Universidade do Estado da Bahia, Brasil  
Prof. Dr. Rodrigo Marques de Almeida Guerra, Universidade Federal do Pará, Brasil  
Prof. Dr. Saulo Cerqueira de Aguiar Soares, Universidade Federal do Piauí, Brasil  
Prof. Dr. Sergio Bitencourt Araújo Barros, Universidade Federal do Piauí, Brasil  
Prof. Dr. Sérgio Luiz do Amaral Moretti, Universidade Federal de Uberlândia, Brasil  
Prof.ª Dr.ª Silvia Inés del Valle Navarro, *Universidad Nacional de Catamarca*, Argentina  
Prof.ª Dr.ª Solange Kazumi Sakata, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. Universidade de São Paulo (USP), Brasil  
Prof.ª Dr.ª Stanislava Kashtanova, *Saint Petersburg State University*, Russia  
Prof.ª Dr.ª Teresa Cardoso, Universidade Aberta de Portugal  
Prof.ª Dr.ª Teresa Monteiro Seixas, Universidade do Porto, Portugal  
Prof. Dr. Valter Machado da Fonseca, Universidade Federal de Viçosa, Brasil  
Prof.ª Dr.ª Vanessa Bordin Viera, Universidade Federal de Campina Grande, Brasil  
Prof.ª Dr.ª Vera Lúcia Vasilévski dos Santos Araújo, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil  
Prof. Dr. Wilson Noé Garcés Aguilar, *Corporación Universitaria Autónoma del Cauca*, Colômbia  
Prof. Dr. Xosé Somoza Medina, *Universidad de León*, Espanha

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**(eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)**

C569 Ciência e tecnologia para o desenvolvimento ambiental, cultural e socioeconômico II [livro eletrônico] / Organizador Xosé Somoza Medina. – Curitiba, PR: Artemis, 2023.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

Edição bilingue

ISBN 978-65-87396-76-7

DOI 10.37572/EdArt\_270223767

1. Desenvolvimento sustentável. 2. Tecnologia – Aspectos ambientais. I. Somoza Medina, Xosé.

CDD 363.7

**Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422**



EDITORA  
ARTEMIS

2023

Editora Artemis

Curitiba-PR Brasil

[www.editoraartemis.com.br](http://www.editoraartemis.com.br)

e-mail: [publicar@editoraartemis.com.br](mailto:publicar@editoraartemis.com.br)

## PRÓLOGO

Este libro presenta una colección de artículos de investigación que bajo distintos ámbitos de conocimiento realizan avances de interés en la ciencia y la tecnología. La sociedad del siglo XXI se distingue de la de épocas pretéritas por su capacidad analítica. A diferencia de lo que ocurría en otras épocas, en nuestro mundo contemporáneo tenemos demasiada información y avanzar en el conocimiento significa realizar una investigación original sobre otros antecedentes previos y analizar una gran cantidad de datos para poder extraer conclusiones que signifiquen un desarrollo, un avance entre la situación anterior y la posterior, aunque sea a pequeña escala en un contexto local y en un ámbito científico muy concreto. La suma de miles de esos pequeños avances y la interconexión mundial sostienen a la ciencia y la tecnología del siglo XXI.

Este es el objetivo de este libro, realizar avances en la ciencia y la tecnología para el desarrollo ambiental, cultural y socioeconómico, desde un posicionamiento académico, comprometido con el rigor científico y el desarrollo del ser humano.

Para ello se han compendiado veinticuatro artículos de investigación en dos apartados, ciencia y tecnología. En el primer conjunto nos encontramos con artículos que desde las ciencias ambientales o las ciencias sociales realizan propuestas de mejora de aspectos concretos sobre hidrología, regeneración de suelo agrícola, cuidado ambiental, recursos humanos, ciudades igualitarias o paisajes culturales.

En el segundo bloque, se agrupan trabajos de ingeniería química, ingeniería industrial o ingeniería forestal que relatan avances en distintas tecnologías, relacionadas con el biogás de los vertederos de residuos, los usos de nuevos materiales sintéticos, la química de determinados productos y su toxicidad, o las características bioestructurales de la madera de roble.

Xosé Somoza Medina  
Universidad de León, España

## SUMÁRIO

### I CIENCIAS PARA EL DESARROLLO AMBIENTAL, CULTURAL Y SOCIOECONÓMICO

#### **CAPÍTULO 1..... 1**

EL RÍO NAZAS COMO SOLUCIÓN BASADA EN LA NATURALEZA PARA LA COMARCA LAGUNERA

Ana Cecilia Tobías Estrada

José Avidán Bravo Jácome

Alejandra Peña García

 [https://doi.org/10.37572/EdArt\\_2702237671](https://doi.org/10.37572/EdArt_2702237671)

#### **CAPÍTULO 2..... 19**

SIMULACIÓN Y PRONÓSTICO DE CAUDALES DIARIOS DEL RÍO AMAZONAS (TAMSHIYACU) USANDO MODELO HÍBRIDO WAVELET REDES NEURONALES

Lucio Vergara Saturno

Waldo Sven Lavado-Casimiro

 [https://doi.org/10.37572/EdArt\\_2702237672](https://doi.org/10.37572/EdArt_2702237672)

#### **CAPÍTULO 3..... 38**

BIORESTORATION OF AN AGRICULTURAL SOIL IMPACTED BY WASTE MOTOR OIL

Monserrat Torres-Olaya

Juan Luis Ignacio-De la Cruz

Gabriel Gallegos-Morales

Juan Manuel Sánchez-Yáñez

 [https://doi.org/10.37572/EdArt\\_2702237673](https://doi.org/10.37572/EdArt_2702237673)

#### **CAPÍTULO 4..... 50**

CARBONO ORGÁNICO SECUESTRADO EN SISTEMAS AGROFORESTALES EVALUADOS EN EL CANTÓN MEJÍA, PICHINCHA, ECUADOR

R. A. Ramos Veintimilla

C. M. Nieto Cabrera

J. R. Limongi Andrade

F. M. Romero Mancero

 [https://doi.org/10.37572/EdArt\\_2702237674](https://doi.org/10.37572/EdArt_2702237674)

**CAPÍTULO 5..... 65**

CREATIVIDAD, INGENIO Y EDUCACIÓN PARA TRANSFORMAR EN VALOR LOS RESIDUOS GENERADOS DE LA PODA DE ÁRBOLES; EL CASO DEL PROSOPIS GLANDULOSA (MEZQUITE)

José Melero-Oláguez  
Argelia Melero-Hernández  
Jorge Murillo-Romo  
Arturo Murillo-Herrera

 [https://doi.org/10.37572/EdArt\\_2702237675](https://doi.org/10.37572/EdArt_2702237675)

**CAPÍTULO 6..... 74**

PROGRAMA DE CONSERVACIÓN Y FOMENTO DE LA CULTURA DE CUIDADO AMBIENTAL EN EL MUNICIPIO DE SAN JUAN ATZOMPA, PUEBLA, MÉXICO

Sergio Alberto Vega Cisneros  
Fabiola Mendoza Morales  
Rosa María Canalizo Bravo  
M.A. Claudia Domínguez Olmos  
M.A. Rosario Mejía Ramírez  
M.A. Adalit Arias Aragón

 [https://doi.org/10.37572/EdArt\\_2702237676](https://doi.org/10.37572/EdArt_2702237676)

**CAPÍTULO 7..... 80**

EMPRENDEDORISMO 360°

Luis Alberto Ynfante

 [https://doi.org/10.37572/EdArt\\_2702237677](https://doi.org/10.37572/EdArt_2702237677)

**CAPÍTULO 8..... 89**

ELEMENTOS CLAVES PARA LA PROFESIONALIZACIÓN DEL RECURSO HUMANO EN ORGANISMOS OPERADORES DE MÉXICO

Carlos Alejandro Hernández Morales  
Daniel Salas Limón

 [https://doi.org/10.37572/EdArt\\_2702237678](https://doi.org/10.37572/EdArt_2702237678)

**CAPÍTULO 9..... 102**

ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO ESCOLAR MODALIDAD VIRTUAL Y PRESENCIAL EN LA UNIDAD DE APRENDIZAJE DE FÍSICA BÁSICA DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CAMPECHE

Mayté Cadena González

María Alejandra Sarmiento Bojórquez

Juan Fernando Casanova Rosado

 [https://doi.org/10.37572/EdArt\\_2702237679](https://doi.org/10.37572/EdArt_2702237679)

**CAPÍTULO 10..... 115**

MEJORAMIENTO DE LA FUERZA DE TRABAJO UTILIZANDO SIMULACION

Jorge Tomás Gutiérrez Villegas

María Leticia Silva Ríos

Edgar Omar Gutiérrez Villegas

 [https://doi.org/10.37572/EdArt\\_27022376710](https://doi.org/10.37572/EdArt_27022376710)

**CAPÍTULO 11..... 125**

LA PERSPECTIVA DE GÉNERO EN LAS CIUDADES ESPAÑOLAS. UN ANÁLISIS EXPLORATORIO

Bárbara Atanes Delgado

Xosé Somoza Medina

 [https://doi.org/10.37572/EdArt\\_27022376711](https://doi.org/10.37572/EdArt_27022376711)

**CAPÍTULO 12..... 149**

UN SENDERO CON TERRITORIALIDAD LOCAL EN LA QUEBRADA DE EL TALA, VALLE DE CATAMARCA

Ezequiel Fonseca

Claudio Caraffini

Cristian Melián

 [https://doi.org/10.37572/EdArt\\_27022376712](https://doi.org/10.37572/EdArt_27022376712)

**II TECNOLOGÍAS PARA PARA EL DESARROLLO AMBIENTAL, CULTURAL Y SOCIOECONÓMICO**

**CAPÍTULO 13..... 158**

ESTUDIO DE MODELOS MATEMATICOS PARA CALCULO DEL BIOGAS PRODUCIDO EN UN VERTEDERO

Sandra Maria Martinez

Patricia María Albarracin

Luis Francisco Garcia

Santiago Ezequiel Torres

 [https://doi.org/10.37572/EdArt\\_27022376713](https://doi.org/10.37572/EdArt_27022376713)

**CAPÍTULO 14..... 164**

TECNOLOGÍA BTS-MP<sub>DRY</sub> PARA LA LIMPIEZA DEL BIOGÁS. UNA FORMA EFICIENTE DE ELIMINAR COMPONENTES PELIGROSOS DEL BIOGÁS DE VERTEDEROS

Joaquín Reina Hernández

 [https://doi.org/10.37572/EdArt\\_27022376714](https://doi.org/10.37572/EdArt_27022376714)

**CAPÍTULO 15..... 174**

GEOPOLÍMEROS: EL AVE FENIX DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN EMERGENTES Y SU APLICACIÓN EN LA REMEDIACIÓN AMBIENTAL

Luis Felipe Rodríguez Alfaro

Edith Luévano Hipólito

Leticia Myriam Torres Martínez

 [https://doi.org/10.37572/EdArt\\_27022376715](https://doi.org/10.37572/EdArt_27022376715)

**CAPÍTULO 16..... 185**

MACROPOROUS SILICON STRUCTURES IN 700 NM AND 500 NM

Angel Rodríguez

Didac Vega

Jordi Llorca

 [https://doi.org/10.37572/EdArt\\_27022376716](https://doi.org/10.37572/EdArt_27022376716)

**CAPÍTULO 17..... 198**

PARTIAL REPLACEMENT OF SODIUM CHLORIDE BY POTASSIUM CHLORIDE IN GREEN TABLE OLIVES. LOOKING FOR A HEALTHY AND ECONOMIC ALTERNATIVE IN ARGENTINA

Mariela Beatriz Maldonado

Leonel Lisanti

Ariel Márquez

Noemi Graciela Maldonado

Pablo Enrique Martín

Daniela Adriana Barrera

 [https://doi.org/10.37572/EdArt\\_27022376717](https://doi.org/10.37572/EdArt_27022376717)

**CAPÍTULO 18..... 207**

ENSAYOS DE PUESTA A PUNTO PARA ESTUDIOS DE DIFUSIÓN DE ARSÉNICO EN *DAUCUS CAROTA*

Oscar Daniel Galvez

Mariela Beatriz Maldonado

 [https://doi.org/10.37572/EdArt\\_27022376718](https://doi.org/10.37572/EdArt_27022376718)

**CAPÍTULO 19** ..... **216**

TOXIC EFFECTS OF CONSTITUENTS OF THE FERN *STICHERUS QUADRIPARTITUS* AGAINST *SPODOPTERA FRUGIPERDA* AND *PLODIA INTERPUNCTELLA*

Fernando Livio Corzo

Susana Beatriz Popich

 [https://doi.org/10.37572/EdArt\\_27022376719](https://doi.org/10.37572/EdArt_27022376719)

**CAPÍTULO 20** ..... **228**

ANÁLISIS DE CASO EN EL CAMPO DE LA INGENIERÍA HACIENDO USO DE TÓPICOS DE LAS CIENCIAS BÁSICAS. UN ENFOQUE BASADO DISEÑO INSTRUCCIONAL

Alejandro Armando Hossian

Emanuel Maximiliano Alveal

 [https://doi.org/10.37572/EdArt\\_27022376720](https://doi.org/10.37572/EdArt_27022376720)

**CAPÍTULO 21** ..... **245**

SUPPLEMENTARY FAILURE MODE AND EFFECT ANALYSIS (FMEA) FOR SAFETY APPLICATION STANDARDS DIN EN ISO 13849 SAFETY FUNCTION-FMEA

Christa Düsing

David Prust

 [https://doi.org/10.37572/EdArt\\_27022376721](https://doi.org/10.37572/EdArt_27022376721)

**CAPÍTULO 22** ..... **264**

REACCIÓN DE ESPECIES FORESTALES DE ULTRA-RÁPIDO CRECIMIENTO A PODA TOTAL, EN ESTEPA ESPINOSA MONTANO BAJO, ECUADOR

R. A. Ramos Veintimilla

A. S. Guanaga Paredes

F. A. Sigcha

F. M. Romero Mancero

 [https://doi.org/10.37572/EdArt\\_27022376722](https://doi.org/10.37572/EdArt_27022376722)

**CAPÍTULO 23** ..... **279**

INFLUENCIA DE LA PARED CELULAR EN LA DENSIDAD DE LA MADERA DE ROBLE (*Quercus robur* L.)

Guillermo Riesco Muñoz

Andrés Remacha Gete

 [https://doi.org/10.37572/EdArt\\_27022376723](https://doi.org/10.37572/EdArt_27022376723)

**CAPÍTULO 24 .....288**

EMERGENCY REMOTE TEACHING IN PROCESS SIMULATION USING DWSIM: A  
CASE STUDY FROM DIQ-UMAG, CHILEAN PATAGONIA

Daniela Navarro-Pérez

Juan C. Moreno-Díaz

Pedro Simeone-Barrientos

 [https://doi.org/10.37572/EdArt\\_27022376724](https://doi.org/10.37572/EdArt_27022376724)

**SOBRE O ORGANIZADOR.....312**

**ÍNDICE REMISSIVO .....313**

# CAPÍTULO 1

## EL RÍO NAZAS COMO SOLUCIÓN BASADA EN LA NATURALEZA PARA LA COMARCA LAGUNERA<sup>1</sup>

Data de submissão: 16/01/2023

Data de aceite: 03/02/2023

### Ana Cecilia Tobías Estrada

Posgrado del Instituto Mexicano de  
Tecnología del Agua  
México

<https://mx.linkedin.com/in/ana-cecilia-tob%C3%ADas-45881016a>

### José Avidán Bravo Jácome

Instituto Mexicano de  
Tecnología del Agua  
México

### Alejandra Peña García

Instituto Mexicano de  
Tecnología del Agua  
México

**RESUMEN:** El río Nazas ha interrumpido su caudal natural por más de cincuenta años en la zona metropolitana de la Comarca Lagunera, principalmente debido a su represamiento en la cuenca alta, lo anterior para responder a los requerimientos de riego agrícola en expansión en la región, dejando de lado las necesidades ambientales del ecosistema, como el caudal

<sup>1</sup> Publicado originalmente en IAHR-AMH XXIX CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA MÉXICO, 15 AL 19 DE NOVIEMBRE DE 2021, EVENTO VIRTUAL.

ecológico del río en las cuencas media y baja. De esta forma se plantea la posibilidad de restablecer los escurrimientos mínimos en la zona metropolitana, a través del uso de instrumentos de gestión hídrica como las zonas de reserva ambiental, uso ambiental, transmisiones de derechos, reconocimiento de derechos al río, con la finalidad de restaurar el ecosistema original y los efectos adversos como desertificación, que se presentan en la zona, bajo una perspectiva de soluciones basadas en la naturaleza y de respeto a los derechos humanos a un medio ambiente y al agua de los habitantes de la región.

**PALABRAS CLAVES:** Río. Caudal mínimo. Presa. Derechos. Cauce. Cuenca. Agua. Laguna. Medio ambiente. Ecosistema. Agricultura. Tierra. Riego. Gestión. Coahuila. Durango. Comarca Lagunera.

### NAZAS RIVER AS NATURE-BASED SOLUTION IN COMARCA LAGUNERA

**ABSTRACT:** The Nazas river has interrupted its flow since fifty years ago approximately, in the metropolitan area of Comarca Lagunera, mainly due to damming in the basin upping, the previous for respond to irrigations requests in expansion in the region, leaving aside the environment needs of ecosystem, as the ecological flow of the river in the media and low basins. Of this way it approach the possibility of restore the minimum flows in the metropolitan area, through use of water

management instruments as the environmental reserve zones, environmental use of water, transfer of rights, recognition of river rights, with the finality to restore the original ecosystem and the adverse effects as desertification, that are presented in the area, with nature-based solutions perspective and human rights vision, in special environment and water rights of the region citizens.

**KEYWORDS:** River. Minimum flow. Dam. Rights. Riverbed. Watershed. Water. Lagoon. Environment. Ecosystem. Agricultura. Land. Irrigation. Management. Water management. Coahuila. Durango. Comarca Lagunera.

## 1 INTRODUCCIÓN

El río Nazas y las lagunas de Mayrán, la que fuera la de Tlahualilo y Viesca, son los protagonistas naturales en este trabajo, que busca una profunda concientización social alrededor de la importancia de la conservación y protección de los ecosistemas de la región, de sus elementos prístinos, y del peligro o efectos negativos para el medio ambiente y para nosotros mismos como habitantes y parte de ese medio, de las alteraciones a los componentes de ese ecosistema. Consecuencias que tienen cabida en casi todos los aspectos de la vida local actual, ambientales, sociales, culturales, económicas, políticas, legales, gubernamentales, de política pública, de procuración y administración e impartición de justicia, en los sistemas de producción, etc., que influyen el contexto de la región y que trascienden a generaciones futuras.

El presente trabajo pretende mostrar a través de la documentación existente, la evidencia técnica disponible y de argumentos jurídicos que, incluyen los derechos humanos, cómo es viable la recuperación de las aguas del Nazas en la zona metropolitana de la Comarca Lagunera (ZML), a través de diversas opciones técnicas, legales y sociales, mismo que ha interrumpido su caudal natural por completo en las cuencas media y baja, debido en mayor parte, a su apresamiento desde la década de 1940. Aguas superficiales que sólo han sido utilizadas para producción agrícola y ganadera, en detrimento del ecosistema y la existencia misma del recurso hídrico en la zona.

Lo anterior bajo una perspectiva de derechos humanos, en especial, los derechos a un medio ambiente sano y al agua en sus diferentes alcances, reconocidos ampliamente por el sistema legal mexicano, tomando en consideración referentes de situaciones similares y sus formas de llegar a una solución, tanto en el territorio nacional como en otras partes del mundo, para proponer de manera multidisciplinaria que responde a la gestión integrada de los recursos hídricos, una recuperación del Nazas en beneficio tanto del ecosistema como de los habitantes de esa región.

## 2 LA COMARCA LAGUNERA Y SU CONTEXTO

La existencia de actividades productivas relacionadas con la agricultura y ganadería en la región siempre ha estado presente, los pobladores especialmente los agricultores terratenientes, construyeron en distintos puntos del río, diferentes represas para controlar las avenidas y garantizar el riego en todas las épocas del año, según han documentado autores como Salas (2011), Wolfe (2010), Plana (2000) y Romero-Navarrete (2006), lo que significa que siempre hemos estado en presencia de un río controlado por la acción humana, construcción de presas como la Calabazas construida en 1849 con la finalidad de irrigar la hacienda de Santa Rosa (López y Sánchez, 2010) en lo que hoy es Gómez Palacio.

Para mediados del siglo XIX, La Comarca Lagunera contaba ya con una extensa red de canales. La producción dependía esencialmente de las bondades de las aguas del río, existía una especie de monocultivo algodónero, menciona Salas, 2011. Precisamente como resultado de la construcción de presas sobre el río se comenzaron a presentar los primeros conflictos sociales por el manejo de sus aguas, entre ellos el litigio iniciado en 1880 por Santiago Lavín en Lerdo, ya que había construido una represa que impedía el flujo de agua a los ribereños inferiores de Coahuila, el tradicional conflicto ribereños de Durango vs. de Coahuila, ocasionando que el gobierno de Coahuila demandara ante la Suprema Corte al gobierno de Durango la rectificación de límites territoriales, puesto que el Nazas sirve (aún) de límite entre esos estados (Azuela, y Díaz, 2012). Esto obedeció a la situación natural y geográfica: "... los agricultores mejor asegurados se encontraban río arriba en el estado de Durango, dado que ellos recibían primero la crecida del río..." en contraste con los ubicados en Coahuila, junto a la Laguna de Mayrán (Wolfe, 2010).

Los ribereños coahuilenses, defendían un sistema de distribución de agua sin criterios topográficos o geográficos, ya que a ellos no les convenía, incluso se observa: "El control público sobre los recursos naturales se convirtió en una de las banderas más insistentes de la Revolución (...). El asunto del Nazas constituye, en este sentido, el prelude de la rectificación nacionalista que la Revolución Mexicana iba a plantear en años posteriores" (Azuela y Díaz, 2012).

Se cuenta con datos de un proyecto para una presa única en el Nazas, debido a su gran irregularidad en avenidas, el cual fue elaborado por S. Pearson and Son Sucesores, S.A. en el año de 1909 a encargo expreso del Presidente Díaz (Wolfe, 2010), probablemente en seguimiento a la tendencia de su gobierno de construir grandes obras de infraestructura en el país.

Uno de los principales impulsores de la construcción de una gran presa durante el Porfiriato fue el revolucionario Francisco I. Madero, quien junto con su familia eran propietarios de haciendas y tierras cultivables en la cuenca baja del Nazas, específicamente en San Pedro (municipio donde desemboca el río en la antigua laguna de Mayrán).

En suma, el gremio de grandes agricultores ha ejercido una fuerte influencia sobre las decisiones en la ZML desde el siglo XIX y hasta la fecha. En realidad, el proyecto de las presas tuvo una construcción social, la cual inició tres décadas antes por los agricultores coahuilenses y rechazado por los de Durango (Wolfe, 2010). Este proceso coincide con la observación del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo “La mayoría de los líderes políticos como Churchill y Stalin, de las primeras décadas del siglo XX, era la idea de que el agua estaba allí para ser explotada sin tener en cuenta la sostenibilidad ecológica” (Watkins, 2006) es decir, la construcción de presas sin contemplar el escurrimiento por los cauces de ríos.

Como parte del plan de reparto agrario cardenista se encontraba la dotación de agua para la agricultura, situación que llevó a la creación de los llamados distritos de riego, que en el caso de la Comarca Lagunera fue el Distrito de Riego 017, creado en 1941 con la finalidad de optimizar y aumentar la producción agrícola y a controlar las avenidas del río con la presa (DOF, 1941). El distrito de riego junto con las presas fue diseñado específicamente para el desarrollo económico de la actividad agrícola y ganadera en la región, dejando de lado totalmente cualquier carácter de protección del agua y del medio ambiente. Fue clara la intención de trasladar a los ejidatarios y pequeños propietarios el manejo del agua y la infraestructura para utilizar la misma, como si fueran empresarios, pero el agua no era de su propiedad, era un bien de la Nación, se les regaló y se les permitió no pagar por su uso, lo que generó desperdicio de la misma.

Conforme avanzaron los años, ya en el Gobierno de Díaz Ordaz (1964-1970), se lanzó un Plan de Rehabilitación, debido a la crisis algodonera, para recuperar el desarrollo económico de la región, se invirtió dinero público en canales de riego y para la construcción de otra presa, más tecnificación en la producción, pero la economía del algodón ya había caído definitivamente (Salas, 2011).

Actualmente “El uso de suelo más extendido es el de agostadero, ocupa más del 80% de la Comarca debido a la influencia que tiene la cría de ganado...” (López y Sánchez, 2010). Lo anterior nos da una idea de cómo se ha ido transformando la región, con intensas modificaciones en el ecosistema, con cultivos de alto valor económico, sin embargo, esto ha llevado al uso insostenido del agua en el desierto (López y Sánchez,

2010), de hecho al ser una de las áreas más tecnificadas del país constituye la principal cuenca lechera a nivel nacional, la única ubicada en un desierto (López y Sánchez, 2010).

### 3 RECURSOS HÍDRICOS EN LA REGIÓN

El río Nazas ha presentado históricamente conflictos sociales en torno al uso de sus aguas, situación que no es nueva y siguió vigente aún a finales del siglo XX, tal como se desprende de la exposición de motivos para la actual Ley de Aguas Nacionales expedida en 1992: "... excesiva sobreexplotación de los acuíferos, creciente contaminación del recurso, intensa y conflictiva competencia entre los usuarios (...) aspectos que prevalecen principalmente en las cuencas de (...) Nazas..." (SCJN, 1992), era evidente la competencia por el uso del agua entre los agricultores desde el siglo XIX, dejando ver el entorno de gestión que está en estudio.

La ZML de estudio se encuentra en la cuenca endorreica Nazas-Aguanaval, el río interior principal es el Nazas. Según datos de CONAGUA, este río tiene un escurrimiento natural medio superficial de 2,101 hm<sup>3</sup>/año, su longitud es de 1,081 km y corresponde a 90,865 km<sup>2</sup> de área de la cuenca (CONAGUA, 2017). El Nazas nace en Durango, en la Sierra Madre Occidental en los ríos Ramos y Sextín, esta parte alta de la cuenca genera aproximadamente el 85% de escurrimientos de toda la cuenca (Salas, 2011). Este río se encuentra dentro de la región hidrológico administrativa No. 36 Nazas-Aguanaval, que tiene una extensión de 92,000 km<sup>2</sup> extendidos desde la Sierra Madre Occidental de Durango hasta las antiguas lagunas de Viesca y Mayrán en Coahuila (Salas, 2011).

Según información actualizada por CONAGUA de la disponibilidad media anual para aguas superficiales nacionales, en la región Nazas- Aguanaval existe disponibilidad al 2015 en las cuencas hidrológicas Río Sextín con un volumen disponible a la salida de 102.697 millones de metros cúbicos, Río Ramos con 209.412, Presa Lázaro Cárdenas con 389.636, Agustín Melgar con 466.437, Presa Francisco Zarco 494.425, Los Ángeles 494.978, todas en millones de metros cúbicos anuales (DOF, 2015), que son las que aportarían agua superficial a la ZML. En la actualidad no escurre agua por el cauce del río en la ZML, esto es, inmediatamente después del Área Natural Protegida humedal Cañón de Fernández en Lerdo, a pesar de haber agua disponible en las presas, coincidentemente, es donde comienza también el área de manejo a cargo del Distrito de Riego 017.

Figura 1.- Cauce seco del Nazas (a color) Fuente: Google earth.



Desde 1940/1946 el Nazas se encuentra regulado por la presa Lázaro Cárdenas, mejor conocida como El Palmito. Esta presa ubicada en el municipio de Indé en Durango, tiene una elevación de 1618.110 msnm, con una capacidad de almacenamiento de 2469.850 hm<sup>3</sup> en su nivel de aguas máximas ordinarias (NAMO); y en su nivel de aguas máximas extraordinarias (NAME) 4278.541 hm<sup>3</sup> de capacidad y elevación de 1632.000 msnm, según cifras del monitoreo de presas en el país del SINA.

Otro vaso que contiene las aguas del río Nazas, es la presa Francisco Zarco conocida como Las Tórtolas ubicada en Cuencamé, Durango, ubicada en la cuenca media, la cual inició sus operaciones en 1968. Tiene una elevación de 1207.390 msnm, una capacidad de almacenamiento de 280.486 hm<sup>3</sup>. Su nivel de aguas máximas ordinarias (NAMO) es 309.240 hm<sup>3</sup> de capacidad de almacenamiento y 1208.200 msnm de elevación; en su nivel de aguas máximas extraordinarias (NAME) corresponde a 383.160 hm<sup>3</sup> de almacenamiento, su cortina cuenta con una altura de 39.5 metros, y 2.950 metros de borde libre.

Justo en las inmediaciones de la presa anterior, se encuentra ubicado el humedal sitio Ramsar Cañón de Fernández, Decretada como área natural protegida estatal en el 2004, este humedal es una zona de recarga de los mantos acuíferos que abastecen a los pozos de la ZML, fue declarado sitio Ramsar en 2008, es un lugar con necesidades de restauración según manifiesta el propio Gobierno de Durango.

En la Comarca Lagunera existe veda de aguas superficiales, la cual fue establecida por decreto de la entonces Secretaría de Agricultura y Fomento el 5 de abril de 1932, con anuencia de la extinta Comisión Nacional de Irrigación, con la finalidad de evitar una alteración de las condiciones del Nazas, ya que se preveía la creación de

sistemas nacionales de riego, que conllevaba estudios de encauzamiento y captación de aguas del río para aprovecharlas en el riego, y era necesaria que prevalecieran las mismas circunstancias hasta el final de los estudios de la presa proyectada (DOF, 1932). De esta manera se declaró la imposibilidad de otorgar concesiones de agua superficial por un periodo de diez años, abarcando toda la cuenca hidrográfica del río tanto en Durango como en Coahuila, desde su origen hasta su desembocadura en la laguna de Mayrán (DOF, 1932), veda que se actualizó posteriormente hasta que en 1967 se declaró por tiempo indefinido.

El caudal medio diario que sale de las presas Lázaro Cárdenas y Francisco Zarco es muy similar, inclusive al salir de la primera unidad de riego (Est 36060) el caudal se mantiene casi en los mismos valores, el problema se presenta al ingresar a la ciudad de Lerdo, al caer el caudal a casi la mitad (18.4 m<sup>3</sup> /s), producto de las derivaciones hacia el Distrito de Riego 017. La disminución del caudal se observa aún más en la estación 36034 con casi 7 m<sup>3</sup> /s de caudal medio anual, situación que explica en mucho la falta de agua en el cauce.

Los escurrimientos del Nazas controlados por las presas mencionadas, cuya operación inició en 1946 y 1968 respectivamente han provocado paisajes secos en la ZML. CONAGUA aseguró en investigaciones recientes que, la mayor parte del agua recibida es derivada hacia los canales del Distrito de Riego 017, y sólo en los años de precipitación extraordinaria, como lo fueron en 1958, 1968, 1991, 1992 y 2008, los volúmenes excedentes de agua en las presas han sido vertidos por el cauce, conducidos parcialmente hasta la laguna de Mayrán, su zona natural de descarga (CONAGUA, 2015).

En cuanto a fuentes subterráneas, el acuífero Principal Región Lagunera, del cual abastece principalmente a la población para uso doméstico, presenta un déficit de -113.432028 de millones de metros cúbicos anuales, según la actualización de la disponibilidad media anual de acuíferos en México publicada por CONAGUA en enero de 2018. Lo anterior derivado de que se extraen aproximadamente 647.5 millones de metros cúbicos anuales y la recarga natural es de 534.1 Mm<sup>3</sup>, lo que significa que el principal problema del agua subterránea son las extracciones excesivas, sin una recarga efectiva.

#### **4 INSTRUMENTOS DE GESTIÓN HÍDRICA**

Aunado a la utilización de zonas de reserva ambiental, concesiones para uso ambiental, transmisiones de derechos de agua, así como programas especiales de manejo, principalmente se busca la implementación de un caudal ecológico en la ZML

que, responda a las necesidades ambientales y de ciclo del agua en la región, con la participación efectiva de las comunidades involucradas directamente.

La definición de caudal ecológico puede establecerse como “la cantidad, calidad y variación del gasto o de los niveles de agua reservada para preservar servicios ambientales, componentes, funciones, procesos y la resiliencia de ecosistemas acuáticos y terrestres que dependen de procesos hidrológicos, geomorfológicos, ecológicos y sociales” según esta norma mexicana sobre caudales ecológicos (NMX, 2012).

Para los autores de Ríos libres y vivos, el caudal ecológico: “es un instrumento de gestión porque permite articular aspectos del manejo del territorio, los ecosistemas y el agua, y conciliar en los espacios de participación y gobernanza reconocidos por la Ley de Aguas Nacionales (los Consejos de Cuenca, así como las Comisiones y Comités de Cuenca y Comités Técnicos de Aguas Subterráneas) el uso social y productivo del agua, constituyendo un planteamiento estratégico de manejo integrado de cuencas hidrográficas” (González, et al., 2017). En ese sentido, de los datos disponibles, es posible contar con volúmenes para la recuperación del río en la ZML, siempre y cuando escurran hasta la cuenca media y baja naturalmente en el Nazas, dada su característica de río irregular. En ese sentido, de los datos disponibles, es posible contar con volúmenes para la recuperación del río en la ZML:

Figura 2.- Escurrecimientos históricos superficiales de la región (a color). Fuente: elaboración propia.

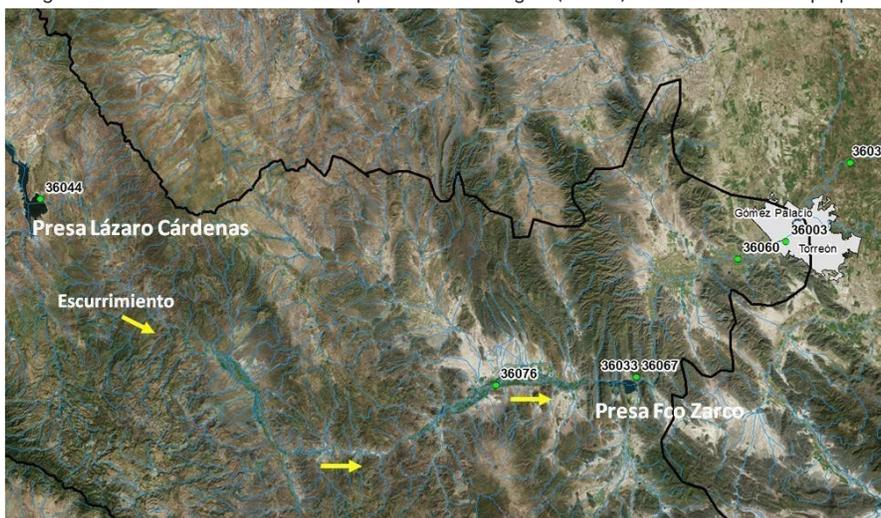
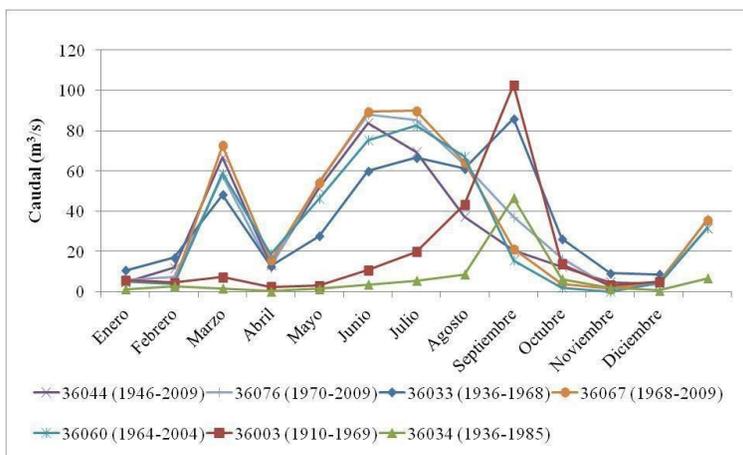


Figura 3.- Escurrimientos históricos superficiales de la región (a color). Fuente: elaboración propia.



Seguindo los anteriores parámetros, en distintas partes del mundo se han desarrollado programas de gestión del agua, como los *National principles for the provision of water for ecosystems* en Australia, dictados desde 1996 por los departamentos ambiental y de agricultura (*Australian Government, 1996*). Entre estos principios se prevé el panorama en el que existan previamente usuarios del agua en un ecosistema, así como la implementación de un caudal ecológico en volúmenes lo más óptimo posible para sostener la vida natural en la zona, al tiempo del reconocimiento de esos derechos de agua (*Australian Government, 1996*).

Estos principios australianos destacan que, cuando sea imposible la implementación de agua en los ríos debido a la existencia de derechos de agua previos, la autoridad debe buscar medidas como la reasignación en otros lugares, para poder garantizar los volúmenes de agua necesarios en los ecosistemas, por lo cual es indispensable respetar procesos ecológicos y sólo destinar usos de agua en caso de estar satisfechos los mínimos vitales (*Australian Government, 1996*).

Otro ejemplo es el río *Whanganui* en Nueva Zelanda, donde se emitió una legislación utilizada como instrumento de gestión, emitida en 2017, alude a lo que podemos llamar el primer río del mundo con derechos reconocidos *per se* (*New Zeland, 2017*).

La Directiva Marco del Agua en la Unión Europea es un instrumento de gestión que data del año 2000, fue diseñado para proteger los cuerpos de agua y las cuencas hidrográficas respetando las formaciones geográficas naturales no los límites territoriales de los países ya que reconoce el manejo por cuencas como el más idóneo para la gestión del agua (Unión Europea, 2010). La directiva en comento establece que la disponibilidad de agua es especialmente vulnerable al cambio climático, frente a este fenómeno se

ha impulsado la adopción de caudales ecológicos en los ecosistemas, tomando en consideración al agua elemento central de la regulación del clima. (Unión Europea, 2010).

La recuperación de los cursos de agua ha sido una de las causas para el desmantelamiento de presas en la región, como el caso del río Selune en Francia, que sería único en su tipo, al ser el primero en apoyarse en estudios científicos previos para su liberación total (*L'institut Agro*, 2020). Entre los puntos que incluye tal programa de restauración se encuentran: análisis de la restauración ecológica y mecanismos a utilizar en ese río para transformar el territorio; convertir el sitio en un estándar científico y de prueba para otras regiones; acciones tomadas bajo el mandato de los ministerios de agua y biodiversidad en Francia (*L'institut Agro*, 2020).

Otro ejemplo sobre caudales ecológicos, se presenta en una investigación de Mezger, de la Universidad Complutense de Madrid, que reafirma los estándares sobre la implementación de caudales ecológicos, por ejemplo, en este proceso ecológico se tienen variables para estimar los volúmenes a contemplar, como el caudal mínimo, caudal máximo, de crecida, tasas de cambio y caudal generador (Mezger, 2019). Señala la conveniencia de la caracterización hidrológica en tres periodos clave, para el estudio de los caudales ecológicos: escenarios pre-presa, post-presa y post-caudal ecológico o *e-flow*, con la finalidad de comparar los caudales y su variabilidad a través de la evolución de los sucesos planteados, ya que el objetivo principal es generalmente regresar al estadio pre-presa eliminando los efectos negativos de la construcción de las presas (Mezger, 2020).

A nivel nacional, el río San Pedro Mezquital, gracias a los trabajos desarrollados por la alianza WWF México y la Fundación Gonzalo Río Arronte, la cual desde hace más de diez años comenzó a planear la implementación de un caudal ecológico de este río en Durango, derivado de tal propuesta años atrás, fue declarada una reserva para caudal ecológico en 2014, misma que se extenderá al menos por cincuenta años con la finalidad de proteger este ecosistema.

Para justificar legalmente la viabilidad de esta acción, la alianza se valió de la LAN, especialmente del artículo 14 BIS, que señala la responsabilidad del Ejecutivo Federal para mantener y restablecer el equilibrio hidrológico de los ecosistemas vitales para el agua; así como de la NOM-011-CNA-2000, Conservación del recurso agua. Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales, la cual, si bien no es una norma para caudales, señaló la alianza "... hace referencia en su introducción a la importancia de 'tomar conciencia de que sólo una fracción de los escurrimientos naturales, superficiales o subterráneos debe

ser aprovechada por el hombre', considerando que 'hay que deducir los requerimientos del ambiente para determinar la cantidad de agua que puede destinarse a los diversos usos humanos" (WWF México, 2009), lo cual es una aproximación a la posibilidad de fundamentar la viabilidad y obligatoriedad de los caudales ecológicos en México.

## **5 LIBERACIÓN DE AGUA POR EL CAUCE DEL RÍO BAJO UNA PERSPECTIVA DE DERECHOS HUMANOS**

Debe considerarse la relación existente entre los fundamentos jurídico administrativos contenidos en las disposiciones en materia hídrica, instrumentos de gestión integrada de los recursos hídricos y estándares de derechos humanos. Y podemos preguntarnos ¿por qué analizar un tema ambiental desde una perspectiva de derechos? ¿Por qué no sólo determinar un daño a la cuenca y un volumen de agua para el río? Actualmente la defensa y protección de los derechos constituye un punto crucial para la planeación de cualquier proyecto de desarrollo, incluidos los de materia hídrica, también los programas de manejo relacionados con el agua, en suma, porque la gestión integrada de los recursos hídricos está relacionada con los derechos humanos, especialmente los derechos al agua y saneamiento, a la participación, el acceso a la información, derecho al medio ambiente, derechos de comunidades originarias, que en este caso podríamos denominar rurales o periféricas.

Destacando el criterio de la Corte Interamericana respecto del derecho a un medio ambiente sano: "Esta Corte considera importante resaltar que el derecho al medio ambiente sano como derecho autónomo, a diferencia de otros derechos, protege los componentes del medio ambiente, tales como bosques, ríos, mares y otros, como intereses jurídicos en sí mismos, aún en ausencia de certeza o evidencia sobre el riesgo a las personas individuales. Se trata de proteger la naturaleza y el medio ambiente no solamente por su conexidad con una utilidad para el ser humano o por los efectos que su degradación podría causar en otros derechos de las personas, como la salud, la vida o la integridad personal, sino por su importancia para los demás organismos vivos con quienes se comparte el planeta, también merecedores de protección en sí mismos. En este sentido, la Corte advierte una tendencia a reconocer personería jurídica y, por ende, derechos a la naturaleza no solo en sentencias judiciales sino incluso en ordenamientos constitucionales" (Corte Interamericana, 2017).

Igualmente, el de la Corte Constitucional de Colombia: "... el desafío más grande que tiene el constitucionalismo contemporáneo en materia ambiental, consiste en lograr la salvaguarda y protección efectiva de la naturaleza, las culturas y formas de vida asociadas

a ella y la biodiversidad, no por la simple utilidad material, genética o productiva que estos puedan representar para el ser humano, sino porque al tratarse de una entidad viviente compuesta por otras múltiples formas de vida y representaciones culturales, son sujetos de derechos individualizables, lo que los convierte en un nuevo imperativo de protección integral y respeto por parte de los Estados y las sociedades. En síntesis, sólo a partir de una actitud de profundo respeto y humildad con la naturaleza, sus integrantes y su cultura, es posible entrar a relacionarse con ellos en términos justos y equitativos, dejando de lado todo concepto que se limite a lo simplemente utilitario, económico o eficientista” (Corte Constitucional, 2016). Donde es posible observar el principio de interés superior del medio ambiente, esto en la sentencia respecto del río Atrato.

Los argumentos anteriores constituyen directrices para los gobiernos de los estados, como la observancia de las obligaciones de protección y garantía, propias del derecho internacional de los derechos humanos, aplicadas al medio ambiente, de esta manera, el Estado es el primer responsable de la protección del río, sin perjuicio de los deberes de protección y cuidado a cargo de las comunidades aledañas (su representante), materializando esa protección mediante políticas públicas ambientales responsables.

Similar es el criterio de la Corte Suprema Argentina en el caso del río Atuel, aludiendo a una nueva regulación del agua ecocéntrica, destacó que el medio ambiente y el agua ya no son solamente vistos como objetos de propiedad o de mera utilidad a las personas y la utilidad privada que se puede obtener de los mismos, sino que es necesaria una visión sistémica, integral, que garantice la existencia de los ecosistemas (Corte Suprema de la Nación, 2017).

Lo cual nos hace replantear la idea de la prelación de los usos actuales de agua previstos por la Ley de Aguas Nacionales mexicana, donde no se observa una prioridad indiscutible hacia la conservación de los cuerpos de agua, sino solamente declaraciones genéricas o un uso ambiental en los últimos lugares de prioridad, que no han protegido correctamente al río en la ZML.

Incluso, es viable incluir expresamente en lesa ley o cualquier otra que se expida al efecto, la obligatoriedad para los Organismos de Cuenca de contemplar los volúmenes necesarios para caudales ecológicos en los ríos, entendiendo que es volumen de agua será fijo o en su caso a incrementarse, siempre y cuando no ponga en riesgo la existencia misma del ecosistema, y los usos consuntivos siempre sujetos a la disponibilidad y existencia del río, esto como parte de la necesaria protección de la naturaleza y sus elementos como el agua y su ciclo, como entes sujetos de derechos a mantener su propia existencia amenazada por actividades humanas.

En este sentido, la implementación de un caudal ecológico se vuelve imprescindible dadas las condiciones de hecho descritas, similares a las resueltas, por cierto, por la Corte Argentina respecto del río Atuel ya aludido, donde se sentenció a las provincias responsables a determinar y poner en práctica un caudal ecológico, con fundamento en la obligación tutelar del medio ambiente, de la mano con la obligación de reparar el daño ambiental.

Respecto del derecho humano al agua: "... en relación con el acceso al agua potable esta Corte ha dicho que ese derecho incide directamente sobre la vida y la salud de las personas, razón por la cual debe ser tutelado por los jueces y -en particular- en el campo de los derechos de incidencia colectiva, por lo que es fundamental la protección del agua para que la naturaleza mantenga su funcionamiento como sistema y su capacidad regenerativa y de resiliencia" (Corte Suprema de la Nación, 2017).

Conectando de esta manera el derecho humano al agua con la protección de la naturaleza, tan necesaria hoy en día en una infinidad de ecosistemas del mundo, y en especial en la indiscutible necesidad de llevarlo a cabo en la ZML. Igualmente refirió esa Corte Suprema que, el derecho al agua potable, se especifica en el presente caso, esto es, el río Atuel, en el derecho a un caudal de agua para la sustentabilidad del sistema, (Corte Suprema de la Nación, 2017), con un sello especial e interesante razonamiento para determinar un nuevo tipo de derecho ambiental: el derecho a los caudales ecológicos, que va más allá de las teorías convencionales de los derechos humanos a un medio ambiente sano o al agua potable.

A través de un decreto se pueden establecer zonas de reserva para la protección ecológica, incluyendo la conservación o restauración de ecosistemas. Lo anterior significa la existencia de una reserva de agua para uso ambiental, en el entendido de que el río recupere poco a poco su sistema original, acciones que, se pueden fundamentar en los artículos 38, primer párrafo; 39; 40, fracción X; 41, fracción III; así como los artículos 15, fracciones III y X; 14 BIS 5, fracción VII; sobre la inclusión de la gestión integrada de los recursos hídricos con la consecuente conservación de recursos naturales y ecosistemas como parte de los programas hídricos, incluso con la posibilidad de plantear subprogramas por cuenca o región para corregir la sobreexplotación, el respeto del uso ambiental o de conservación ecológica del agua; así como el principio de restablecer el equilibrio ecológico.

Es viable y necesario estudiar todo el padrón de usuarios actualizado de aguas superficiales en la ZML, inscritos o no en el Distrito de Riego 017, establecer diversos parámetros de selección como: volumen concesionado, ya sea directamente, por transmisiones o a través de terceros para su mismo beneficio; superficie destinada a

cultivo; tipo de cultivo, para determinar si es de subsistencia o se destina a forraje por ejemplo; tecnología utilizada; si cuenta o no con volúmenes de aguas subterráneas; historial de volúmenes reales utilizados y contrastarlos con su título de concesión; analizar si es una empresa agroindustrial o ejidatario o pequeño propietario, principalmente. Para estar en posibilidad de estudiar supuestos de extinción y revocación en que incurran, para realizar rondas de procesos de negociación que incluyan esos procedimientos administrativos, así como la renuncia de la concesión, en términos de los dispuesto por los artículos 22; 25; 28, fracc. V; 29, fracc. VI; 29 BIS 3, fracc. II y V; 29 BIS 4 de la ley de agua vigente.

Como ejemplo de utilización de esta modalidad, mencionaremos rápidamente el caso de Cuatro Ciénegas en Coahuila, donde CONAGUA autorizó en 2014 un cambio de uso agrícola a uso de conservación ecológica, en los ya otorgados títulos de concesión de esa región, área de especial interés ambiental por sus pozas singulares que han sido objeto de diversas investigaciones, puestas en peligro por la sobreexplotación de agua para actividades agrícolas. Se le otorgó un título de concesión a una organización no gubernamental únicamente para fines ambientales, para lo cual se calculó el volumen necesario para caudal ecológico y se reservó el mismo para este fin (Pronatura, 2018).

La tendencia internacional en materia de protección de ríos u otros cuerpos de agua en años recientes ha apuntado al reconocimiento de derechos per se a estos ecosistemas, con la finalidad de restaurar los cauces dañados por la intensiva extracción de agua, generalmente potable, o a causa de la contaminación generada por las descargas de las ciudades e industrias. Esto, requiere de un nuevo paradigma de entendimiento donde cambien los procesos políticos y sociales en torno a nuestra relación con el medio ambiente, donde los derechos ambientales impongan ahora límites visibles a las actividades humanas, principalmente las insostenibles, en este caso de agua.

Cambiar la mentalidad de que el beneficiario principal siempre será la persona humana, para dirigirnos a una nueva teoría que nos permita reconocer derechos a sujetos o entes no tradicionales, bajo la gestión solidaria de su comunidad inmediata, con la organización que mejor convenga. Igualmente dirigido al acceso a la justicia ambiental no reconocida de manera fehaciente durante años, hacia las comunidades alrededor de los ecosistemas, dándoles el correspondiente deber de cuidado y preservación atinentes. La pregunta podría ser ¿está realmente preparada la sociedad para ese cambio visión que implica más responsabilidad de su parte?

La toma de decisiones horizontales, desde épocas como el Porfiriato, han menoscabado la gestión idónea del agua, siendo necesario que esas decisiones sean

lideradas por los miembros de autoridades locales y personas de las comunidades adyacentes, en el manejo del agua local, incluso sin considerarla aguas nacionales en caso de que fuera necesario.

Si se habla de derechos a un río, se tendría que hablar forzosamente de quién representaría los derechos del mismo, quién vigilaría que se cumplieran las condiciones ambientales para su conservación. ¿Tendría que ser el gobierno federal a través del Organismo de Cuenca? ¿Una comisión integrada por los diferentes actores sociales como en el río Atrato? ¿Una organización no gubernamental como en Cuatro Ciénegas? ¿Los pobladores adyacentes del río como en Nueva Zelanda?

En aras de reconocerle al río Nazas el derecho a su misma existencia a lo largo de todo su cauce, esto es, a lo largo de toda la Comarca Lagunera, reconocer y decretar su derecho a mantener su caudal ecológico, en primer lugar, mínimo, para luego considerar volúmenes mayores que permitan el ciclo mismo del agua.

La restauración aludida mediante el monitoreo de un caudal ecológico se coloca en lo que Naciones Unidas ha descrito en su último informe sobre agua y cambio climático, como soluciones basadas en la naturaleza (SbN), las cuales no requieren únicamente de infraestructuras grises, sino en utilizar el mismo ciclo del agua en este caso, para recuperar la cuenca baja en la ZML: “Soluciones basadas en la naturaleza (SbN) que están inspiradas y apoyadas por la naturaleza y que utilizan o imitan los procesos naturales, y que pueden contribuir a la mejora de la gestión del agua, al tiempo que proporcionan servicios ecosistémicos, así como una amplia gama de co-beneficios secundarios, incluida la adaptación, la mitigación y la resiliencia al cambio climático” (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, 2020).

Y precisamente como la ZML se inserta en un centro urbano, resulta aplicable lo dispuesto por ese mismo informe, respecto de las SbN en ciudades: “En las zonas urbanas, los enfoques de infraestructura verde (o desarrollo de bajo impacto) podrían utilizarse para adaptarse al cambio climático proyectado. Estos enfoques también tienen una variedad de co-beneficios, como la mitigación del cambio climático (...) pueden ayudar a responder a los impactos del cambio climático en los recursos hídricos...” (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, 2020).

La implementación de caudales ecológicos como SbN es una respuesta eficaz para la recuperación de la cuenca baja, incluida la sobreexplotación de los acuíferos como en seguida se plantea, mediante la cual se combaten los efectos adversos del cambio climático, se respeta el ciclo natural del agua, se preservan los elementos naturales de la cuenca, se aprovechan las aguas para navegación y se gestionan los recursos hídricos de manera más sostenible.

Las características hidráulicas del río, de las presas, la descripción general de la ZML, desde su actividad económica hasta social, pasando por el estatus jurídico del río mismo y las concesiones de sus aguas otorgadas, permiten exponer razones que para justificar en este trabajo de investigación, la pertinencia de liberar volúmenes de agua contenidos en las presas, para que corran a través del cauce natural y se recupere el ecosistema, incluyendo los acuíferos con poca o nula recarga.

Se analizan en específico los siguientes tópicos bajo una perspectiva de derechos y de gestión integral de los recursos hídricos: daño ambiental, desertificación y alteración hidrológica en la ZML; afectación en las fuentes de agua de la ZML, especialmente subterránea a causa de la falta de escurrimientos históricos y su correspondiente recarga, principalmente por los datos obtenidos en la avenida extraordinaria del Nazas en 2008:

Tabla 1.- Volúmenes de recarga en los acuíferos provenientes de aguas superficiales. Fuente: elaboración propia con datos de CONAGUA.

Volumen total descargado por la Presa Zarco	1,087 Hm <sup>3</sup>
Volumen total derivado por los canales	230 Hm <sup>3</sup>
Volumen total transitado por el Nazas aguas abajo de San Fernando	857 Hm <sup>3</sup>
Recarga entre la presa Zarco y San Fernando	60 Hm <sup>3</sup>
Recarga a las calizas en el tramo San Fernando- Calabazas	240 Hm <sup>3</sup>
Recarga a los acuíferos Principal y Somero	+ 450 Hm <sup>3</sup>
Evaporación en la laguna de Mayrán	90 Hm <sup>3</sup>
Volumen total transitado por el cauce	840 Hm <sup>3</sup>
Extracción de pozos (2008)	1,222 Hm <sup>3</sup> /año

De los registros de escurrimientos en la zona y los derechos de uso agrícola reconocidos y otorgados, podemos aproximarnos a una apropiación *de facto* del agua del río por un grupo minoritario de concesionarios en detrimento del derecho a un medio ambiente sano, siendo necesaria la limitación de extracciones en aras de la protección de la cuenca; la agricultura y agroindustria intensivas como actividades extractivas de agua.

## 6 CONCLUSIONES

La actividad agrícola de pobladores originarios e inmigrantes en la Comarca Lagunera siempre ha estado presente, impactando el medio ambiente y aprovechando las aguas del río. Es viable la recuperación del río Nazas en la ZML, como una SbN para entre otras cosas, recargar los acuíferos, a través de la puesta en marcha de un plan de trabajo multidisciplinario que, implemente volúmenes para el caudal ecológico del río, que tome

en cuenta los aspectos de la gestión integrada de los recursos hídricos y una perspectiva de derechos humanos.

Luego de repasar diferentes opciones jurídicas para que circule agua por el caudal, que van desde la transmisión y cambio de uso agrícola de derechos de agua, para trasladar volúmenes para conservación ecológica. Entre esos caminos propuestos, también es válida la idea del otorgamiento de una personalidad jurídica del Nazas, en su carácter de usuario principal, con la finalidad que sea titular de derechos para su propia existencia y preservación, a cargo de una representación con presencia de organizaciones sociales, universidades locales y pobladores adyacentes al río, que sean capaces de vigilar y comprometerse a la defensa de las aguas del río en colaboración con el Organismo de Cuenca y su respectivo Consejo.

Es necesario que sea incluida expresamente en la Ley de Aguas Nacionales o la ley aplicable que se expida al efecto, la obligatoriedad para los Organismos de Cuenca de contemplar en las cuencas hidrológicas los volúmenes necesarios para el caudal ecológico de los ríos, o cuerpos de agua existentes, principalmente frente a daños ambientales y alteraciones hidrológicas. Entendiendo al efecto que, cualquier uso consuntivo del agua queda supeditado a la existencia misma de los ecosistemas; con la consecuente elaboración de la norma oficial mexicana para determinar caudales.

Un plan integral que requiere de evaluaciones biológicas y sociales (impacto social) donde se analicen los asentamientos humanos en el cauce y que abone a un ordenamiento ecológico territorial metropolitano, e hídrico de la cuenca. En suma, la recuperación del caudal del Nazas es un proceso social, que requiere de su construcción a lo largo de los años, y necesita la participación de todos los grupos sociales y de gobierno para su cristalización, y una profunda concientización del respeto por la naturaleza y del agua, a la par de las reformas institucionales y legales necesarias. ¿Será que la naturaleza pueda ganarse el respeto de la población en la urbanidad de la Comarca Lagunera?.

## REFERENCIAS

**Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zeland** (1996). *National Principles for the provision of water for ecosystems*. Australia: Sustainable Land and Water Resources Management Committee Subcommittee on Water Resources.

**Azuela, A. y Díaz, M.** (2012). *El litigio del Tlahualilo: presagio de un derecho de propiedad sin arrogancia* en Ensayos sobre la propiedad (247- 308). México: Instituto de Investigaciones Jurídicas UNAM.

**Corte Interamericana de Derechos Humanos** (2017). Opinión Consultiva 23/17 Medio Ambiente y Derechos Humanos, Costa Rica: Corte Interamericana de Derechos Humanos.

**Comisión Europea** (2000). Directiva Marco del Agua de la Unión Europea. Bélgica: Unión Europea.

**Corte Suprema de Justicia de la Nación Argentina** (2017). Sentencia río Atuel. Argentina.

**Corte Constitucional Colombia** (2016). Sentencia río Atrato Colombia.

**González, I., Salinas, S., Guerra, A., Sánchez, R. y Ríos, E.** (2017). *Ríos Libres y Vivos, Introducción al caudal ecológicos y reservas de agua* en Cuadernos de divulgación ambiental (1- 48). México: SEMARNAT.

**López, A. y Sánchez, A.** (2010). Comarca Lagunera. *Procesos regionales en el contexto global*. México: Instituto de Geografía UNAM.

**Mezger, G., De Stefano, L. y González, M.** (2019). *Assessing the establishment and implementation of environmental flows in Spain*. Springer link, 64, (721-735).

**Plana, M.** (2000). *La cuestión agraria en La Laguna durante la Revolución*. Revista Historia Mexicana, 50, 197.

**Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.** (2020). *Agua y Cambio Climático. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2020*. Francia: Naciones Unidas.

**Pronatura Noreste** (2018). *Seguridad Hídrica del Valle de Cuatro Ciénegas. Un análisis de las concesiones superficiales, volúmenes y usos del agua de Cuatro Ciénegas, Coahuila, México*. México: Pronatura Noreste, A.C.

**Romero-Navarrete, L.** (2006). *Conflicto y negociación por el agua del Nazas, 1888-1936. Del dominio público a la propiedad nacional*. Revista Región y sociedad, 18, 147-176.

**Salas, H.** (2011). *El río Nazas. La historia de un patrimonio lagunero*. México: Instituto de Investigaciones Antropológicas UNAM.

**Watkins, K.,** (2006). *Informe sobre desarrollo humano: Más allá de la escasez: Poder, pobreza y crisis mundial del agua*. España: Grupo Mundi-Prensa.

**Wolfe, M.** (2010). *Conflicto por un cambio de régimen de aguas en La Laguna: la construcción social de la primera gran presa en el río Nazas, 1900-1936*. Academia.edu, 100. 2020, de Academia.edu e Universidad Iberoamericana Unidad Torreón Base de datos.

**Wolfe, M.** (2017). *Watering the Revolution: An environmental and Technological History of Agrarian Reform in Mexico*. California: Duke University Press.

## CAPÍTULO 2

### SIMULACIÓN Y PRONÓSTICO DE CAUDALES DIARIOS DEL RÍO AMAZONAS (TAMSHIYACU) USANDO MODELO HÍBRIDO WAVELET REDES NEURONALES<sup>1</sup>

Data de submissão: 23/01/2023

Data de aceite: 10/02/2023

#### Lucio Vergara Saturno

Programa de Doctorado en Recursos  
Hídricos-UNALM  
Autoridad Nacional del Agua-ANA  
Lima, Perú

[https://ctivitae.concytec.gob.pe/  
appDirectorioCTI/VerDatosInvestigador.  
do?id\\_investigador=255413](https://ctivitae.concytec.gob.pe/appDirectorioCTI/VerDatosInvestigador.do?id_investigador=255413)  
<https://orcid.org/0000-0001-9211-8484>

#### Waldo Sven Lavado-Casimiro

Servicio Nacional de Meteorología e  
Hidrología-SENAMHI  
Lima-Perú

[https://ctivitae.concytec.gob.pe/  
appDirectorioCTI/VerDatosInvestigador.  
do?id\\_investigador=347](https://ctivitae.concytec.gob.pe/appDirectorioCTI/VerDatosInvestigador.do?id_investigador=347)  
<https://orcid.org/0000-0002-0051-0743>

**RESUMEN:** El pronóstico de caudales a corto plazo tales como horarios o diarios es de vital importancia para la mitigación y defensa de inundaciones. La precisión de los pronósticos se ve influida tanto por la

<sup>1</sup> IAHR-AIIH XXVII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA LIMA, PERÚ, 28 AL 30 DE SETIEMBRE DE 2016.

calidad de los datos históricos y el método seleccionado para pronosticar el futuro. En este estudio, un modelo híbrido wavelet red neuronal (WNN) es abordado para predecir caudales a través de una combinación de dos técnicas, la transformada wavelet y redes neuronales artificiales (ANN). Las ANN han mostrado gran habilidad en modelamiento y pronóstico de series de tiempo no estacionario y no lineal, y la transformada wavelet provee descomposición útil sobre varios niveles de resolución. Los subseñales descompuestos fueron alimentados como input a la ANN para obtener los valores de caudales previstos para varios horizontes de tiempo. Los modelos de pronóstico ANN y WNN son aplicados a datos diarios de caudales en la primera estación de aforo (Tamshiyacu) en la corriente principal de la cuenca del río Amazonas en Perú. Los desempeños relativos de estos modelos fueron medidos usando diversos criterios de habilidad de pronóstico y verificados con datos no entrenados, utilizando Matlab (R.2013a). Los resultados en términos de raíz del error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) mostraron la eficacia y la mejora significativa del modelo híbrido WNN en comparación con la otra técnica de ANN estándar, y se concluye que el método aplicado es potencialmente muy útil para el pronóstico de caudales a corto plazo.

**PALABRAS CLAVES:** Pronóstico a corto plazo. ANN. Transformada wavelet. Híbrido. Río Amazonas.

## SIMULATION AND FORECASTING OF DAILY STREAMFLOWS OF THE AMAZON RIVER (TAMSHIYACU) USING WAVELET NEURAL NETWORKS HYBRID MODEL

**ABSTRACT:** The short-term streamflow forecasting such as hourly or daily is of vital importance for flood mitigation and defense. The accuracy of forecasts is influenced by both the quality of past data and the method selected to forecast the future. In this study, a hybrid wavelet neural network (WNN) model was used to predict streamflow through a combination of two techniques, wavelet transform and artificial neural networks (ANN). ANNs have shown great ability in modeling and forecasting of nonstationary and nonlinear time series, and wavelet transform provides useful decomposition on several resolution levels. The decomposed subsignals were fed as input to ANN to get the forecasted streamflow values for various time horizons. Forecasting models ANN and WNN are applied to daily streamflow data in the first gauging station (Tamshiyacu) into the mainstream of the Amazon river basin in Peru. The relative performance of these models was measured using various forecast skill criteria and verified with data untrained, using Matlab (R.2013a). The results in terms of root mean square error (RMSE) and coefficient of determination ( $R^2$ ) showed the effectiveness and significant improvement of the hybrid WNN model compared to the other standard technique ANN, and it is concluded that the method applied is potentially very useful for short-term streamflow forecasting.

**KEYWORDS:** Short-term streamflow forecasting. ANNs. Wavelet transform. Hybrid. Amazon River.

### 1 INTRODUCCIÓN

Recientes estudios científicos muestran que la región Amazónica ha sufrido severos eventos hidrológicos extremos, como sequías extremas y fuertes inundaciones [Espinoza et al., 2009; Lavado et al., 2012; Espinoza et al., 2011; Espinoza et al., 2012; Espinoza et al., 2013], que han traído consigo grandes pérdidas humanas y materiales en esta región. Además, han evidenciado un incremento de estos eventos, particularmente en los países andino-amazónicos (Perú, Bolivia, Ecuador y Colombia) desde inicios de los años 1990 [Espinoza et al., 2009].

Estas problemáticas, motivó que diversas instituciones de investigación y gestión del agua emprendieran acciones para mitigar los daños que pudieran ocasionar futuros eventos similares. P. ej., desde el año 2013 la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y el Instituto Geofísico del Perú (IGP) con la colaboración de otras instituciones, está llevando a cabo el estudio denominado “Sistema de alerta cualitativo para la previsión de eventos hidrológicos extremos en la Amazonía peruana”, que permite inferir las posibles condiciones hidrológicas en los principales ríos de la Amazonía peruana; dirigido por el Dr. Jhan Carlo Espinoza V.

El presente trabajo surge de la necesidad que se presentó en dicho estudio respecto al desarrollo de modelos de pronóstico de series de tiempo hidrológicos con

la finalidad de cuantificar descargas futuras a corto plazo en los principales ríos de la Amazonía peruana, que conllevará al fortalecimiento del sistema de previsión cualitativa antes mencionada. Puesto que, Mashor (2002) indica que los riesgos hidrológicos debido al caudal (p. ej., inundaciones) pueden reducirse si se tienen efectivos sistemas de predicción de caudales a corto plazo.

Enfoques actuales de pronósticos hidrológicos se pueden clasificar en dos categorías generales: modelos basados en procesos y modelos basados en datos [Wang, 2006; Di et al., 2014]. En general, las principales diferencias entre los dos tipos de modelos son la representación de los procesos gobernantes y sus necesidades de información [Shrestha y Nestmann, 2009]. Para la predicción a tiempo real, los modelos basados en datos podrían ser favorable, ya que los modelos físicos sofisticados a menudo necesitan enormes cantidades de datos y tiempos de cálculo largos para la calibración del modelo [Chau et al., 2005]. Asimismo, los modelos basados en datos no toman en cuenta los procesos físicos hidrológicos, en su lugar identifican la relación entre las entradas y salidas matemáticamente [Di et al., 2014].

En los últimos años, las redes neuronales (ANN), como un método de inteligencia artificial, se han convertido extremadamente populares para la predicción y pronóstico en diversas áreas, incluyendo las finanzas, generación de energía, medicina, recursos hídricos y ciencias ambientales [Maier y Dandy, 2000; Abrahart et al., 2004; ASCE Task Committee, 2000 a,b]. Los modelos de ANN son estructuras matemáticas flexibles que son capaces de identificar complejas relaciones no lineales entre conjuntos de datos de entrada y salida [Wang et al., 2008; Dibike y Solomatine, 2001; ASCE Task Committee, 2000 a,b]. Sin embargo, también se informó de que los modelos de ANN no son muy satisfactorios en términos de precisión porque consideran sólo unos pocos aspectos del comportamiento de la serie temporal [Wang y Ding, 2003].

Recientes estudios muestran que los modelos híbridos Wavelet-ANN han superado significativamente a los modelos ANN tradicionales en el pronóstico de flujos de ríos [Adamowski y Sun, 2010; Krishna et al., 2011; Nourani et al., 2014]. Esta técnica se emplea mediante la combinación de dos métodos, transformada wavelet discreta (TWD) y ANN. Los datos de TWD ayudan a mejorar la capacidad de un modelo de pronóstico mediante la captura de información útil sobre varios niveles de resolución [Adamowski y Sun, 2010; Deka et al., 2012; Zhang et al., 2014]. Asimismo, han encontrado que la transformada de wavelet son muy eficaces con datos no estacionarios [Adamowski, 2008; Deka y Prahlada, 2012; Nourani et al., 2014].

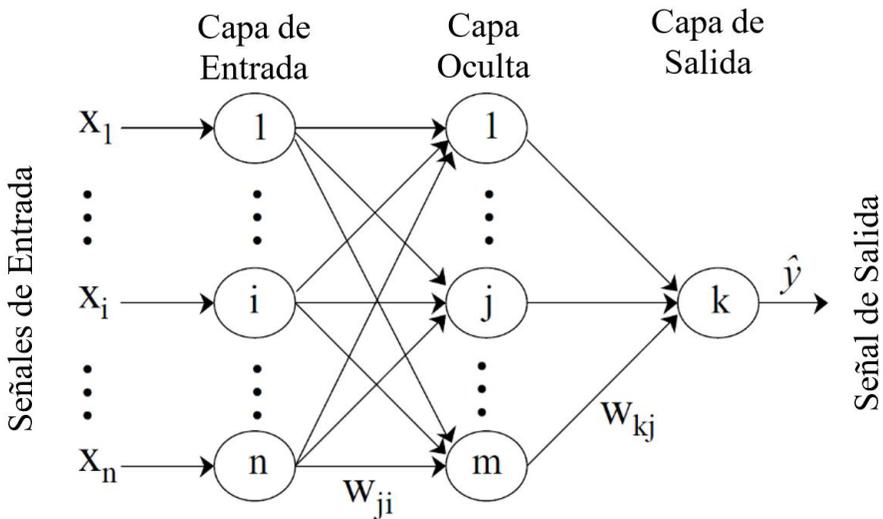
En este estudio, abordamos la eficacia de un modelo híbrido wavelet redes neuronales (WNN) para el pronóstico de series temporales de caudales del río Amazonas

(Tamshiyacu) a corto plazo y comparar su performance con los enfoques convencionales de ANN, utilizando valores previos de caudales diarias. Se trata esencialmente de una red neuronal de perceptrones multicapas con entradas de señales descompuestas a varias resoluciones utilizando la TWD.

## 2 REDES NEURONALES ARTIFICIALES

Una red neuronal artificial (ANN por sus siglas en inglés) es un método computacional o modelo matemático inspirado en la estructura y/o aspectos funcionales de las redes neuronales biológicas, como el cerebro [Haykin, 1999]. Las ANN consisten de elementos simples, densamente interconectados conocidas como neuronas (o nodos), que normalmente están dispuestos en capas (véase Figura 1). Una ANN recibe señales a través de las unidades de entrada y estas señales se propagan y se transforma a través de la red hacia la neurona de salida [De Vos y Rientjes, 2005].

Figura 1.- Arquitectura típica de ANN feedforward con tres capas (Kim y Valdés, 2003).



Una ANN se caracteriza por su arquitectura que representa el patrón de conexiones entre nodos, su método de determinar los pesos de conexión y la función de activación o de transferencia [ASCE Task Committee, 2000a]. La arquitectura de la ANN consiste del número de capas ocultas y el número de nodos en la capa de entrada, capas ocultas y la capa de salida (véase Figura 1). Las ANN con una capa oculta se utilizan comúnmente en modelamiento hidrológico, ya que estas redes son consideradas para proporcionar suficiente complejidad para simular con precisión las propiedades no lineales del proceso hidrológico [Kisi, 2004b; Wu et al., 2009].

El perceptrón multicapa (MLP por sus siglas en inglés) feedforward entre muchos paradigmas de ANN es de lejos, el más popular usado en modelamiento hidrológico debido a su simplicidad [Maier and Dandy, 2000], que fueron desarrollados para el pronóstico de caudales a corto plazo, que por lo general utiliza la técnica de propagación de error hacia atrás para entrenar la configuración de la red [Wu et al., 2009]. En las redes feedforward las conexiones entre los nodos fluyen en una dirección: desde una capa de entrada, a través de una o más capas ocultas, a una capa de salida [Dawson y Wilby, 2001]. La expresión explícita para un valor de salida de ANN feedforward está dado mediante la siguiente ecuación:

$$\hat{y}_k = f_o \left[ \sum_{j=1}^m w_{kj} \cdot f_h \left( \sum_{i=1}^n w_{ji} x_i + w_{jo} \right) + w_{ko} \right] \quad [1]$$

donde  $n$  es el número de muestras,  $m$  es el número de neuronas ocultas,  $w_{ji}$  es un peso en la capa oculta que conecta el  $i$ -ésimo neurona en la capa de entrada y el  $j$ -ésimo neurona en la capa oculta,  $w_{jo}$  es el sesgo para el  $j$ -ésimo neurona oculta,  $f_h$  es la función de activación de la neurona oculta,  $w_{kj}$  es un peso en la capa de salida que conecta el  $j$ -ésimo neurona en la capa oculta y el  $k$ -ésimo neurona en la capa de salida,  $w_{ko}$  es el sesgo para el  $k$ -ésimo neurona de salida, y  $f_o$  es la función de activación para la neurona de salida. Los pesos son diferentes en la capa oculta y salida, y sus valores pueden cambiar durante el proceso de entrenamiento de la red [Kim y Valdés, 2003].

El propósito del entrenamiento de la red es optimizar los pesos  $w$  conectadas a capas vecinas y sesgos  $h$  de cada neurona en la capa oculta y la capa de salida, mediante el algoritmo de Levenberg-Marquardt (LM) [Wu et al., 2009]. Este algoritmo fue seleccionado ya que suele ser más rápido y más fiable que otras variantes de backpropagation [Antil y Tape, 2004].

### 3 ANÁLISIS WAVELET Y DESCOMPOSICIÓN

#### 3.1 TRANSFORMADA DE WAVELET

La transformada de wavelet (TW), desarrollado durante las últimas dos décadas en la comunidad matemática, que parece ser una herramienta más eficaz que la transformada de Fourier (TF) en el estudio de series de tiempo no estacionario. La principal ventaja de la TW es su capacidad de obtener simultáneamente información en el tiempo, localización y frecuencia de una señal, mientras que el TF sólo proporcionará información de frecuencia de una señal [Adamowski y Chan, 2011]. La TW provee descomposiciones útiles de la serie de tiempo original, por lo que los datos de TW mejoran la capacidad de

un modelo de pronóstico mediante la captura de información útil sobre varios niveles de resolución que son usados como entradas en los modelos de pronóstico [Adamowski, 2008; Zhang et al., 2014]. El objetivo básico de TW es lograr una representación escala temporal completa de los fenómenos localizados y transitorios que ocurren en diferentes escalas de tiempo [Pramanik et al., 2011]. La TW se pueden dividir en dos categorías: La transformada wavelet continua (TWC) y la transformada wavelet discreta (TWD) [Pandey et al., 2010]. La TWC se define como la suma sobre todos los tiempos de la señal multiplicada por versiones desplazados y escalados de la función wavelet  $\psi$ :

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx \quad [2]$$

donde  $a$  es un parámetro de escala;  $b$  es un parámetro de posición; y  $\psi$  corresponde al conjugado complejo. Las gráficas de los coeficientes de la TWC son precisamente la vista de la escala temporal de la señal. Sin embargo, calcular los coeficientes wavelet en todas las escalas posible es que consume mucho tiempo y genera gran cantidad de información. Por lo tanto, el uso de la TWC para la predicción no es prácticamente posible [Zhang et al., 2014].

En hidrología, las series hidrológicas observadas se expresan a menudo como series discretas, por lo que la TWD se prefiere en la mayoría de los problemas de predicción de sistemas hidrológicos, debido a su simplicidad y capacidad para calcular con menos tiempo para descomponer una serie hidrológica en un conjunto de coeficientes y subseñales bajo diferentes escalas [Sang, 2012]. Para una función wavelet madre y para una señal dada  $f(t)$ , una TWD se define como sigue:

$$f(t) = \sum C_{j_0,k} \phi_{j_0,k}(t) + \sum_{j>j_0} \sum \omega_{j,k} 2^{j/2} \psi(2^j t - k) \quad [3]$$

donde  $j$  es el índice de dilatación o de nivel,  $k$  es un índice de translación o de escala,  $\phi_{j_0,k}$  es una función de escalado de coeficientes de escala gruesa,  $c_{j_0,k}, \omega_{j,k}$  son la función de escalado de coeficientes de detalle, y todas las funciones de  $\psi(2^j t - k)$  son ortonormales [Pandey et al., 2010].

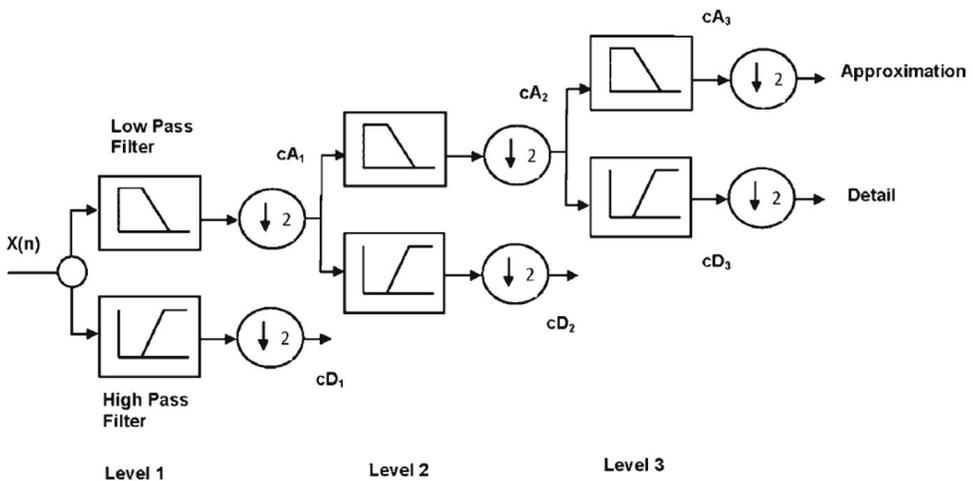
### 3.2 ANÁLISIS MULTIRESOLUCIÓN WAVELET

El análisis multiresolución wavelet utiliza TWD para descomponer una señal cruda (sin procesar) en una serie de señales de componentes. La TWD se describe brevemente en el ítem anterior. El algoritmo de descomposición Mallat's se emplea en este estudio.

Según la teoría de Mallat's, la serie tiempo discreto original  $X_t$  se descompone en una serie de señales de aproximación y detalle linealmente independientes [Wu et al., 2009].

En el proceso de filtrado, en su nivel más básico, la señal original  $X_t$  pasa a través de dos filtros complementarios (filtros de paso bajo y de paso alto) y emerge como dos señales: aproximaciones (A) y detalles (D). Las aproximaciones son los componentes de alta escala y de baja frecuencia de la señal. Los detalles son los componentes de baja escala y de alta frecuencia. Normalmente, el contenido de baja frecuencia de la señal (aproximación, A) es el más importante. Demuestra la identidad de la señal. El componente de alta frecuencia (detalle, D) es el matiz. También es importante observar que la señal cruda (Q) está formado por estos componentes, es decir,  $Q=A_1+D_1$  o que  $A_1=A_2+D_2$ , y de la misma forma  $Q=A_3+D_3+D_2+D_1$ . El proceso de descomposición puede repetirse, con aproximaciones sucesivas siendo descompuesto en turnos, de modo que una señal se divide en muchos componentes de resolución más baja, esto se llama el árbol de descomposición wavelet, véase Figura 2 [Santos et al., 2014; Satyajai Rao et al., 2014].

Figura 2.- Diagrama de análisis multiresolución de la señal [Satyajai Rao et al., 2014].

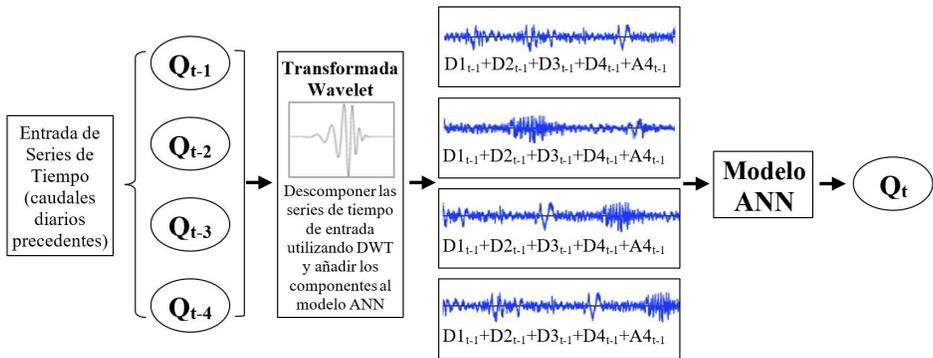


#### 4 COMBINACIÓN DE LA TWD Y ANN

El campo de modelamiento basado en datos comprende una gran variedad de técnicas, en su mayoría procedentes de las estadísticas y la inteligencia artificial [Di et al., 2014]. La mayoría de los estudios existentes han demostrado que las ANN son capaces de superar a las técnicas estadísticas tradicionales [Maier y Dandy, 2000], asimismo, han demostrado ser buenos en la simulación de sistemas complejos, no lineales. Por otro lado, Zhang et al. (2015) a partir de resultados de simulación indicaron que el método WNN

es más preciso que la ANN y se puede utilizar eficazmente en la predicción de series temporales no lineales. Asimismo, Wang y Ding (2003) revelaron que el método WNN podría aumentar la precisión prevista y prolongar la longitud de tiempo de predicción.

Figura 3.- Esquema del modelo híbrido wavelet red neuronal (WNN) [Kisi, 2011].



En este estudio, dos técnicas de modelamiento, la TWD y los modelos ANN, se combinaron para producir un modelo híbrido WNN que integra las ventajas de ambos. En WNN, el proceso de modelamiento integrado incluye dos pasos: (1) La serie temporal de caudales, es decir, una señal original, se descompone con la TWD en subseries una aproximación ( $A_n$ ) con baja frecuencia, y detalles ( $D1, D2, \dots, D_n$ ) con alta frecuencia; y (2) Estas subseries se usaron como entrada para la red, con la serie original como objetivo (véase Figura 3). Para obtener los pesos óptimos (parámetros) de la estructura de la red, el algoritmo de LM se utiliza para entrenar a la red. El nodo de salida representa el valor original a un paso delante [Adamowski y Sun, 2010; Krishna et al., 2011; Deka et al., 2012; Wei et al., 2012; Satyaji Rao et al., 2014; Nourani et al., 2014]. Todos los análisis se realizaron utilizando el Toolbox Wavelet™ y Neural Network™ en Matlab.

## 5 EVALUACIÓN DE CRITERIOS DE DESEMPEÑO

Dawson *et al.* (2007) discutieron 20 medidas de desempeño generalmente utilizados en la predicción hidrológica. Para este estudio, principalmente seleccionamos cuatro medidas de desempeño para evaluar el desempeño de los diferentes modelos (ANN y WNN). Todos los modelos fueron evaluados durante la etapa de calibración y validación usando los siguientes índices estadísticos: error absoluto medio (MAE), raíz del error medio cuadrático (RMSE), error relativo absoluto medio (MARE) y coeficiente de determinación ( $R^2$ ).

El RMSE prevé una buena medida de bondad de ajuste en caudales altos, mientras, medidas de MAE una perspectiva más balanceada de las bondades de ajuste en caudales

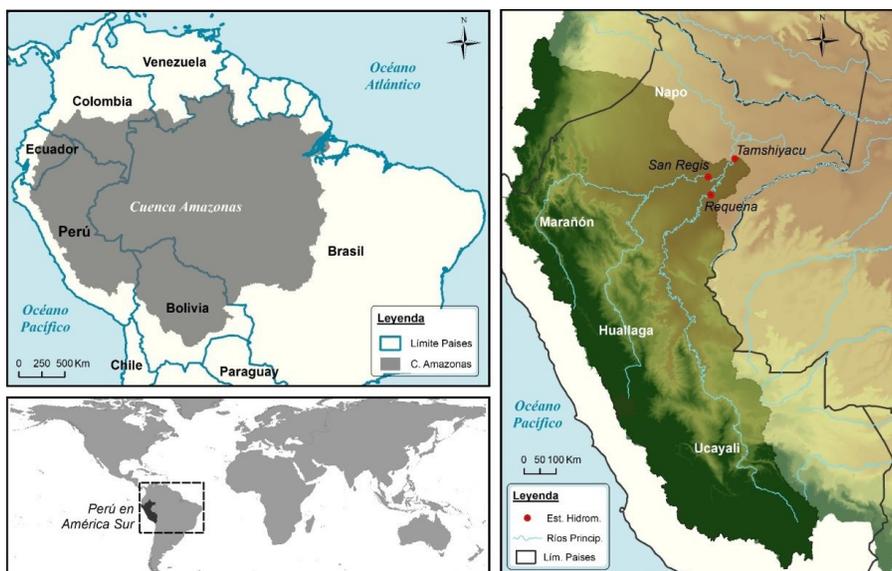
moderados. Los modelos con RMSE bajo se tratan como mejores modelos [Dadu y Deka, 2013].  $R^2$  es un índice del grado de relación lineal entre los datos observados y simulados, se ha utilizado ampliamente para la evaluación de modelos, a pesar de que son muy sensibles a los valores extremos altos (outliers) e insensible a diferencias aditivo y proporcionales entre las predicciones del modelo y los datos medidos [Wang et al., 2009]. P. ej., una interpretación común es que un valor de  $R^2$  de 0,9 indica un desempeño del modelo muy satisfactorio, un valor en el rango de 0,8 a 0,9 indica un desempeño bastante bueno, y valores por debajo de 0,8 indican un ajuste insatisfactorio [Antil y Tape, 2004].

## 6 AREA DE ESTUDIO Y DATOS

### 6.1 ÁREA DE ESTUDIO

La estación hidrométrica de Tamshiyacu (Figura 4, derecha) es la primera estación de aforo en la corriente principal del río Amazonas, situado aguas abajo de la confluencia de los ríos Maraón y Ucayali cerca de la ciudad de Iquitos (a 50 km aguas arriba de la ciudad de Iquitos), drena un área de cuenca de 750 000 km<sup>2</sup> (53% en los Andes) y tiene un caudal medio anual de 32 000 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> [Espinoza et al., 2006; Espinoza et al., 2011; Guyot et al., 2007]. Además, es el principal tributario occidental de la cuenca del Amazonas, presentando la serie histórica de niveles más larga, con datos del año 1984 hasta el presente [Espinoza et al., 2006; 2011]. Asimismo, su ubicación es estratégica, lo que permite la caracterización de un período de sequías/inundaciones en la población Amazónica.

Figura 4.- Ubicación de Perú en América (izquierda inferior). Cuenca Amazonas en América del sur y países involucrados (izquierda superior). Estación hidrométrica de Tamshiyacu (derecha).



## 6.2 CONJUNTO DE DATOS DISPONIBLES

El conjunto de datos utilizados en este estudio consta de una serie temporal de caudales medias diarias en la estación de aforo Tamshiyacu en el río Amazonas en Perú correspondiente al periodo de 01 de setiembre de 1985 hasta 31 de agosto de 2012 (27 años con 9 862 muestras). Estos datos provienen del monitoreo desarrollado por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) del Perú, como parte del observatorio ORE-HYBAM (SENAMHI-IRD-IGP-UNALM, [www.ore-hybam.org](http://www.ore-hybam.org)). Las características estadísticas del conjunto de datos de caudales diarios se dan en la Tabla 1. El caudal promedio diario fue de 29 610 m<sup>3</sup>/s con un caudal máximo de 55 420 m<sup>3</sup>/s en 19 de abril de 2012 y un caudal mínimo de 8 327 m<sup>3</sup>/s en 5 de setiembre de 2010.

Tabla 1.- Características estadísticas de los caudales diarios del río Amazonas.

Índice	Tamshiyacu [m <sup>3</sup> /s]	Descripción
Min.	8 327	Mínimo
1st Qu.	20 660	1er Cuartil
Median	29 130	Mediana
Mean	29 610	Media
3rd Qu.	38 380	3er Cuartil
Max.	55 420	Máximo
IQR	17 720	Rango Intercuartil
sd	10 771.02	Desviación estándar
cv	0.3638	Coficiente de variación
Skewness	0.1185	Asimetría
Kurtosis	-0.9822	Kurtosis
n	10 398	Número de muestras

## 7 DESARROLLO DE LOS MODELOS

La determinación de la arquitectura en el desarrollo de los modelos es muy importante, para ello, se requiere de variables de entrada. En este estudio, el conjunto de datos de caudales diarios del río Amazonas (Tamshiyacu) que fue la única entrada utilizada. Por ende, valores de caudales antecedentes a menudo se utilizan como entrada, ya que estos son indirectamente indicativos para las condiciones hidrológicas.

Balayneh y Adamowski (2012) utilizaron el 80% de los datos para entrenar los modelos, mientras que el 20% restante de los datos dividieron en dos subconjuntos de prueba y validación con cada conjunto que comprende el 10% de los datos. Para todos los modelos formulados, en este estudio, se utilizaron 78% de los datos para entrenar los modelos, mientras que el 22% restante de los datos se utilizaron para la etapa de prueba.

Para poner a prueba los modelos ANN y WNN, los datos de entrada a la red se lograron extendiéndose hacia atrás desde el tiempo  $t$ , obteniendo series de tiempo  $\{Q_{(t)}, Q_{(t-1)}, \dots, y Q_{(t-6)}\}$ , hasta seis pasos de tiempo anteriores. Se formularon las siguientes combinaciones: i)  $Q_{(t-1)}$ , ii)  $Q_{(t-1)}, Q_{(t-2)}$ , iii)  $Q_{(t-1)}, Q_{(t-2)}, Q_{(t-3)}$ , iv)  $Q_{(t-1)}, Q_{(t-2)}, Q_{(t-3)}, Q_{(t-4)}$ , v)  $Q_{(t-1)}, Q_{(t-2)}, Q_{(t-3)}, Q_{(t-4)}, Q_{(t-5)}$  y vi)  $Q_{(t-1)}, Q_{(t-2)}, Q_{(t-3)}, Q_{(t-4)}, Q_{(t-5)}, Q_{(t-6)}$ . Donde  $Q_{(t)}$  es el valor de descarga del día actual y  $Q_{(t-1)}, \dots$  y  $Q_{(t-6)}$  son valor de caudales pasados de un día hasta los 6 días respectivamente.

En la etapa de pronóstico, a partir de las combinaciones formuladas, ahora queremos estimar  $Q$  en algún tiempo futuro  $Q_{(t+s)} = f(Q_{(t)}, Q_{(t-1)}, \dots)$ , donde  $s$  se llama el horizonte de pronóstico. P. ej., para predecir sólo una muestra de tiempo en el futuro,  $s=1$ . Este es un problema de función de aproximación [Akintola et al., 2011]. En este estudio los modelos han sido desarrollados para diferentes horizontes de pronóstico ( $s=1, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21$  y  $24$  días). Los escenarios de entrada y salida son los mismos para ambos modelos.

## 7.1 MODELOS DE RED NEURONAL ARTIFICIAL (ANN)

En la primera etapa, se desarrollaron modelos ANN utilizando la arquitectura MLP feedforward, sin entradas descompuestos mediante wavelet, es decir, sin procesamiento previo de datos para predecir los datos caudales. Para determinar la arquitectura del modelo ANN, el número óptimo de neuronas en la capa de entrada se determinó mediante prueba y error. Los caudales fueron rezagados para generar varias neuronas en la capa de entrada y el número de neuronas fue elegido como el apropiado, aquellos que proporcionaron valores RMSE más bajos y significativos, tanto en la etapa de entrenamiento y validación. Hubo entre 1-6 entradas para cada modelo ANN.

Tradicionalmente, el número de nodos ocultos para los modelos de ANN se selecciona a través de un método de prueba y error. Sin embargo, un estudio realizado por Balayneh y Adamowski, (2012) indican que el mejor desempeño de una red neural se produce cuando el número de nodos ocultos es igual a  $\log(N)$ , donde  $N$  es el número de muestras de entrenamiento. Asimismo, indican que el número óptimo de neuronas ocultas es  $2n+1$ , donde  $n$  es el número de nodos de entrada. En este estudio, estos dos métodos ayudaron tomar referencia un rango de selección para el número óptimo de nodos ocultos, asimismo, se tomó en cuenta valores cercanos. Cada MLP fue entrenada con 1-18 nodos ocultas en la capa oculta.

Todos los modelos de ANN se han desarrollado utilizando el Toolbox Neural Network de Matlab (R.2013a). La función de transferencia tangente hiperbólica sigmoide (tansig) fue la función de activación de la capa oculta, mientras que la función de activación de la capa de salida fue una función lineal (purelin). Asimismo, fueron entrenados usando

el algoritmo de propagación hacia atrás LM. El objetivo principal fue minimizar el error en la capa de salida mediante la búsqueda de un conjunto de fuerzas de conexión que causan la ANN para producir resultados que son igual o más cerca de los objetivos.

## 7.2 MODELOS HÍBRIDO WAVELET RED NEURONAL (WNN)

En la segunda etapa, los modelos WNN fueron similares a los modelos de ANN utilizados en la primera etapa. Sin embargo, en lugar de utilizar los datos primarios de caudales en la capa de entrada, los modelos WNN utilizaron datos de caudales que se había descompuesto en altas y bajas frecuencias utilizando el algoritmo transformada wavelet. En este estudio, para descomponer la serie original se elige la función Wavelet Daubechies de orden 2 (db2), una de las familias de wavelets más ampliamente utilizados y orden 2 seleccionado por su mejor desempeño.

El número total de neuronas de entrada para los modelos híbrido WNN se determinó en función al mismo número de neuronas de entrada determinadas para los modelos ANN que exhibía el valor más bajo de RMSE y al número de niveles de descomposición (4 niveles mínimos de descomposición " $L = \text{ent}(\log N)$ , siendo N número de muestras de la serie temporal, Nourani et al., (2014)"), para poder comparar las ventajas de las dos técnicas de modelamiento.

Los modelos híbridos WNN fueron entrenados con los datos repartidos exactamente de la misma forma y manera que los modelos tradicionales de ANN, con la excepción de que las entradas se hicieron a partir de subseñales después de que se haya selecciona la descomposición de wavelets. El proceso de selección del número óptimo de neuronas en la capa oculta fue similar al proceso utilizado para los modelos de ANN. Hubo entre 3-20 entradas para cada modelo WNN. Todos los análisis wavelet se realizaron con el Toolbox Wavelet en Matlab (R.2013a).

## 8 RESULTADOS Y DISCUSIONES

De un total de 9 862 (27 años) datos diarios de caudales del río Amazonas fueron particionados en dos partes, los primeros subconjuntos de 7 670 datos (21 años) representando el 78.8% se utilizaron para el entrenamiento de la red y los restantes subconjunto de 2 192 datos (6 años) que representa el 22.2% se utilizaron para la validación de pronóstico de los modelos.

En la primera etapa, un modelo ANN perceptrón multicapa feedforward de propagación hacia atrás sin procesamiento previo de datos fue desarrollado para predecir el caudal diario. Una estructura de red de tres capas ( $p, m, n$ ) se eligió para el

presente estudio, en el que  $p$  es el número de neuronas en la capa de entrada,  $m$  son las neuronas en la capa oculta y  $n$  es el número de neuronas (una sola neurona para todas las formulaciones) en la capa de salida. P. ej., el modelo ANN4 (negrita en la Tabla 2) tiene como estructura (4-17-1), que indica 4 neuronas en la capa de entrada, 17 neuronas en la capa oculta y una sola neurona en la capa de salida.

Cada MLP fue entrenado utilizando el esquema de propagación hacia atrás con el algoritmo de entrenamiento LM, asimismo, utilizando la función de activación sigmoideal (tansig) y lineal (purelin) en la capa oculta y la capa de salida respectivamente para optimizar los parámetros. Se identificó el número óptimo de las neuronas en la capa oculta usando un procedimiento de prueba y error, encontrándose el número de neuronas ocultas de 1 a 18 en función al número de neurona en la capa de entrada. El número de neuronas ocultas se selecciona en base al RMSE más bajo.

Tabla 2.- Resultados del desempeño de los modelos ANN y WNN con diferentes estructuras.

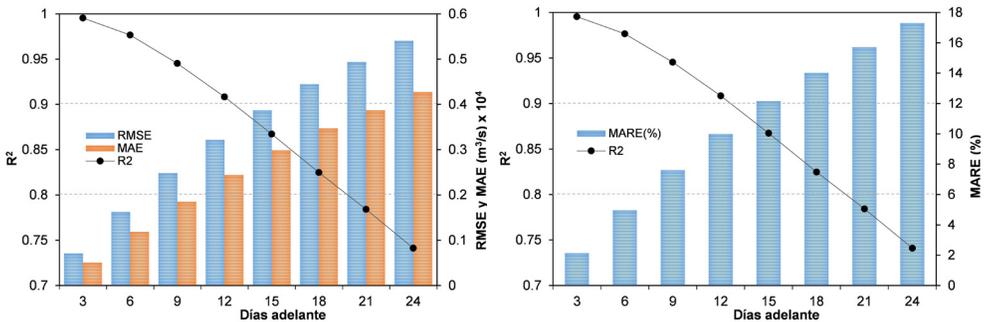
Modelo	Tipo Wavelet	Nivel	Estructura ANN	Calibración			Validación		
				RMSE	MAE	R <sup>2</sup>	RMSE	MAE	R <sup>2</sup>
ANN1	---	---	1-1-1	452.4876	338.5650	0.99819	433.2804	330.6612	0.99861
ANN2	---	---	2-8-1	191.1247	133.2611	0.99968	178.9603	126.9110	0.99976
ANN3	---	---	3-9-1	177.7321	122.8412	0.99972	158.4033	114.1050	0.99981
<b>ANN4</b>	---	---	<b>4-17-1</b>	<b>177.6208</b>	<b>122.7203</b>	<b>0.99972</b>	<b>157.1787</b>	<b>113.1957</b>	<b>0.99982</b>
ANN5	---	---	5-14-1	177.4952	122.3886	0.99972	157.9258	113.7594	0.99982
ANN6	---	---	6-18-1	175.9491	121.8620	0.99973	157.3352	113.0965	0.99982
WNN1	db2	2	3-17-1	417.5706	314.9734	0.99846	404.3648	310.8980	0.99879
WNN2	db2	3	4-9-1	413.6861	311.9660	0.99849	402.3197	306.4643	0.99881
WNN3	db2	4	5-31-1	399.5092	303.7769	0.99859	400.8023	308.1361	0.99881
WNN4	db2	2	6-23-1	105.5777	69.0321	0.99990	102.2373	66.8341	0.99992
WNN5	db2	3	8-27-1	89.8504	59.9276	0.99993	89.5953	59.0330	0.99994
WNN6	db2	4	10-22-1	85.0158	56.5026	0.99994	83.6554	55.7255	0.99995
WNN7	db2	2	9-26-1	87.7928	56.9649	0.99993	82.7690	54.1139	0.99995
WNN8	db2	3	12-25-1	77.6622	50.9402	0.99995	74.8982	49.6111	0.99996
WNN9	db2	4	15-35-1	67.9331	45.8668	0.99996	70.4617	47.5738	0.99996
WNN10	db2	2	12-31-1	50.0689	35.0960	0.99998	56.0083	36.9509	0.99998
WNN11	db2	3	16-24-1	48.7334	33.6675	0.99998	52.1359	35.2722	0.99998
<b>WNN12</b>	<b>db2</b>	<b>4</b>	<b>20-40-1</b>	<b>44.0735</b>	<b>30.9987</b>	<b>0.99998</b>	<b>51.6737</b>	<b>34.9041</b>	<b>0.99998</b>

En este estudio, seis modelos de ANN (ANN1, ..., hasta ANN6 en la Tabla 2) han sido desarrollados con diferentes escenarios de entrada a la red indicadas en la sección de desarrollo de los modelos. Por otro lado, también estructurados para diferentes horizontes de pronóstico ( $s=1, 3, 6$ , hasta 24 días). Sin embargo, los resultados correspondientes a un

plazo de anticipación ( $s=1$ ) durante el periodo de entrenamiento y validación se muestran en la Tabla 2.

El análisis de los resultados de la Tabla 2, se observa claramente que, en la fase de validación, el modelo ANN4 (negrita en la Tabla 2) con estructura (4-17-1) obtiene el mejor desempeño con valores de RMSE y  $R^2$  de 157.18 y 0.99 respectivamente. Asimismo, se observa que el resto de los modelos con mayor número de entradas no mejoran estos resultados.

Figura 5.- Desempeño del modelo ANN4 (4-17-1) en la etapa de entrenamiento en RMSE, MAE, MARE y  $R^2$  para varios horizontes de pronóstico.

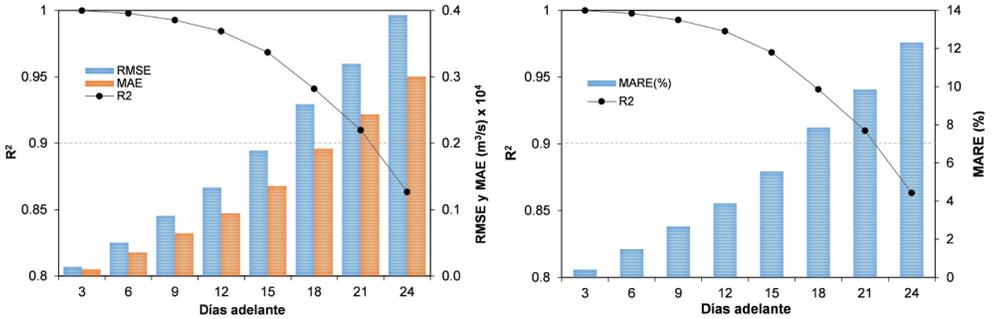


En esta etapa, también se evaluaron los resultados del modelo ANN4 (4-17-1) con los criterios de desempeño RMSE, MAE, MARE (%) y  $R^2$  para varios horizontes de pronóstico mostrados en la Figura 5 para visualizar las variaciones de error. Por tanto, de la Figura 5, según interpretaciones de Antil y Tape (2004), los pronósticos para los 21 y 24 días con valores de  $R^2$  de 0.78 y 0.74 respectivamente, indicarían desempeño de los modelos con ajuste insatisfactorio.

En la segunda etapa, para el desarrollo de los modelos híbridos WNN, los datos de la serie original de caudales se descompusieron a sus componentes de Aproximación y Detalles (subseries) en distintos niveles (2, 3 y 4) utilizando la DWT de la función wavelet Daubechies 2 (db2). Estas subseries se usaron como entradas para la red diseñada, con la serie original como objetivo (target).

En este estudio, se combinaron distintas entradas (i, ii, iii y iv) y niveles de descomposición para formular doce modelos híbridos WNN (WNN1, ..., hasta WNN12 en la Tabla 2) para diferentes horizontes de pronóstico ( $s=1, 3, 6, 9$ , hasta 24 días). Sin embargo, el desempeño de estos modelos en términos de pruebas estadísticas (RMSE, MAE y  $R^2$ ) correspondientes a un plazo de anticipación ( $s=1$ ) en la fase de entrenamiento y validación se da en la Tabla 2.

Figura 6.- Desempeño del modelo híbrido WNN12 (20-40-1) en la etapa de entrenamiento en RMSE, MAE, MARE y  $R^2$  para varios horizontes de pronóstico.



Los resultados del modelo WNN12 (negrita en la Tabla 2) con estructura (20-40-1), muestra claramente su mejor desempeño en la fase de calibración y validación con valores de RMSE de 44.07 y 51.67 respectivamente. Asimismo, se evaluaron los resultados del modelo WNN12 con las pruebas estadísticas RMSE, MAE, MARE y  $R^2$  para varios horizontes de pronóstico que se muestran en la Figura 6 para representar las variaciones de error. De esta Figura 6, de acuerdo con Antil y Tape (2004), el pronóstico para el día 24 con valor de  $R^2$  de 0.86, indicaría desempeño bastante bueno.

## 8.1 COMPARACIÓN DE LOS DOS MODELOS FORMULADOS

La evaluación de los desempeños de estos dos grupos de modelos de pronóstico ANN y WNN correspondientes a un plazo de anticipación ( $s=1$ ) en la fase de entrenamiento y validación en términos de pruebas estadísticas generales (RMSE, MAE y  $R^2$ ) se da en la Tabla 2.

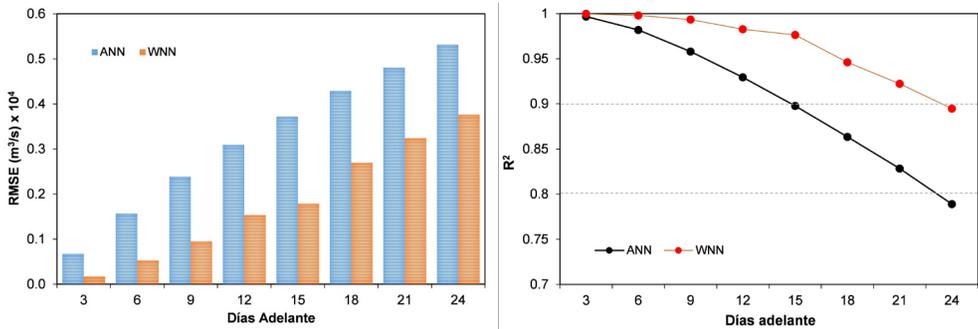
La Figura 7 revela que para todos los horizontes de pronóstico el modelo WNN12 es mucho mejor en comparación con el modelo ANN4 en términos de RMSE y  $R^2$  durante el periodo de validación. P. ej., el RMSE (3 760.29  $m^3/s$ ) es mucho menor para el modelo híbrido WNN12 en comparación con ANN4 (5 317.52  $m^3/s$ ), asimismo, el  $R^2$  (0.89) es mucho mejor para el modelo WNN comparado con ANN (0.79) para el horizonte de pronóstico de 24 días (véase Figura 7).

Los resultados corroboraron que el modelo WNN12 con 20 neuronas de entradas a la red (es decir, se utilizó el cuarto escenario de entrada y el nivel 4 de descomposición con wavelet “db2”), tuvo el mejor desempeño para simular la serie de caudal. Además, el análisis comparativo en términos de  $R^2$  en la etapa de validación mostró que mientras ANN4 podría cumplir satisfactoriamente en pronosticar con precisión hasta los 21 días de horizonte pronóstico, el modelo híbrido WNN12 mejoró significativamente mostrando

un desempeño mucho mejor y prolongando el horizonte de pronóstico hasta los 24 días calificado como satisfactorio (véase Figura 7).

A partir de la Figura 7, también se observó que los valores de los estadísticos varían según el horizonte de pronóstico con RMSE (169.96 m<sup>3</sup>/s a 3760.29 m<sup>3</sup>/s) y el coeficiente R<sup>2</sup> (0.99979-0.89478) para el modelo híbrido WNN; y RMSE (673.85 m<sup>3</sup>/s a 5317.52 m<sup>3</sup>/s) y el coeficiente R<sup>2</sup> (0.99665-0.78902) para el modelo ANN, durante el período de validación. Se puede confirmar que el modelo WNN superó al modelo ANN reduciendo el error RMSE en un 30%, mientras que el coeficiente R<sup>2</sup> se incrementó por encima de 13% para el horizonte de pronóstico más lejano (24 días). Asimismo, el error RMSE se incrementó a 75% y el coeficiente R<sup>2</sup> disminuyó a 0.3% para el horizonte de pronóstico de 3 días.

Figura 7.- Comparación del desempeño del modelo ANN4 (4-17-1) y el modelo híbrido WNN12 (20-40-1) en la etapa de validación en RMSE y R<sup>2</sup> para varios horizontes de pronóstico.



## 9 RESUMEN Y CONCLUSIONES

Centrado en el pronóstico de caudales a corto plazo usando únicamente datos de caudales diarios como variable de entrada se desarrolló un modelo híbrido WNN mediante la combinación de dos métodos, esto es, la TWD y las ANN. La TWD se utilizó para la descomposición de los datos de caudales no estacionarias en series estacionarias. Estos descompuestos alimentaron como entradas a la ANN para pronosticar la serie original. También, el modelo ANN se desarrolló y se compararon con el modelo WNN. Los análisis comparativos revelaron que el modelo WNN exhibe un mejor desempeño en modelamiento de datos de series temporales de caudales diarias.

Además, abordamos la eficacia del modelo híbrido WNN desarrollado utilizando wavelets Daubechies de orden 2 (db2) como wavelets madre para pronosticar series de caudales sobre varios horizontes de tiempo 1, 3, 6, ..., hasta 24 días en la estación de aforo Tamshiyacu situada en el río Amazonas en Perú. Finalmente se determinó que, para todos los casos de horizontes de pronóstico, los modelos WNN proporcionan resultados más

precisos en comparación a los ANN solos. Esto se debe principalmente a la capacidad de la TWD para proporcionar descomposiciones útiles de la serie de tiempo en múltiples niveles de aproximación y detalle.

Las ANN son modelos de pronóstico muy útiles para sistemas hidrológicos donde se requiere realizar pronósticos a corto plazo. La facilidad de recalibración y adaptación del modelo hace que sea posible aplicar los modelos a medida que se dispongan de nuevos eventos y así mejorar con el tiempo la precisión de los pronósticos de los mismos. Sin embargo, no son muy satisfactorios en términos de precisión. Los resultados finales indican que los modelos ANN son superados significativamente por los modelos híbridos WNN como un método nuevo y prometedor de pronóstico de caudales a corto plazo que sería útil para los sistemas de pronóstico de eventos futuros en los ríos de la Amazonía peruana, donde la disponibilidad de datos es limitada.

## 10 AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen a los responsables del Convenio de Cooperación Interinstitucional entre la Autoridad Nacional del Agua-ANA y el Instituto Geofísico del Perú-IGP, por proporcionar las facilidades necesarias para llevar a cabo este estudio. Asimismo, agradecer de manera especial al Dr. Waldo Lavado, investigador científico de SENAMHI, por su orientación, paciencia y conocimientos profundos brindados en su elaboración.

## REFERENCIAS

- Abrahart** R.J., Kneale P.E., See L., (2004). “*Neural Networks in Hydrology*”, A.A. Balkema, Rotterdam.
- Adamowski** J., (2008). “Development of a short-term river flood forecasting method for snowmelt driven floods based on wavelet and cross-wavelet analysis”. *J. Hydrol.* 353, 247–266.
- Adamowski** J., Sun K., (2010). “Development of a coupled wavelet transform and neural network method for flow forecasting of non-perennial rivers in semi-arid watersheds”. *J. Hydrol.* 390, 85–91.
- Adamowski** J. and Chan H. F., (2011). “A wavelet neural network conjunction model for groundwater level forecasting”, *Journal of Hydrology* 407, 28-40.
- Akintola** K.G., Alese B.K. and Thompson A.F., (2011). “Time series forecasting with neural network: a case study of stock prices of intercontinental bank Nigeria”, *IJRRAS* 9(3), 467- 472.
- Anctil** F., Tape D.G., (2004). “An exploration of artificial neural network rainfall-runoff forecasting combined with wavelet decomposition”. *J Environ Eng Sci* 3:121-128.
- Belayneh** A. and Adamowski J., (2012). “Standard Precipitation Index Drought Forecasting Using Neural Networks, Wavelet Neural Networks, and Support Vector Regression”, *App. Comp. Int. & Soft Comp.* 794061, pp. 13.

- ASCE** Task Committee, (2000a). "Artificial Neural Networks in Hydrology-I: Preliminary Concepts", *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 5, No. 2, pp. 115-123.
- ASCE** Task Committee, (2000b). "Artificial Neural Networks in Hydrology-II: Hydrologic Applications", *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 5, No. 2, pp. 124- 137.
- Chau** K.W., Wu C.L. and Li Y.S., (2005). "Comparison of several flood forecasting models in Yangtze River", *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 10, No. 6, 2005, pp. 485-491.
- Dadu** K. S. and Deka P. C., (2013). "Multistep lead time forecasting of hydrologic time series using Daubechies Wavelet-Neural network hybrid model", *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Volume 4, Issue 10, ISSN 2229-5518.
- Dawson** C. W. and Wilby R. L., (2001). "Hydrological modelling using artificial neural networks", *Progress in Physical Geography* 25, 1 pp. 80-108.
- Dawson** C.W., Abrahart R.J. and See L.M., (2007). "HydroTest: A web-based toolbox of evaluation metrics for the standardised assessment of hydrological forecasts", *Env. Mod. & Software* 22, 1034-1052.
- De Vos** N.J., and Rientjes T.H.M., (2005). "Constraints of artificial neural networks for rainfall-runoff modeling: Trade-offs in hydrological state representation and model evaluation", *Hydrol. & Earth System Sciences*, 9:111-126.
- Deka** P. C., Haque L. and Banhatti A., (2012). "Discrete Wavelet-Ann Approach in Time Series Flow Forecasting-A Case Study of Brahmaputra River", *Int. J. of Earth Sc. and Engineering*, 5(4):673-685.
- Deka** P. C. and Prahada R., (2012). "Discrete wavelet neural network approach in significant wave height forecasting for multistep lead time", *Ocean Engineering* 43: 32-42.
- Di** C., Yang X., and Wang X. (2014). "A four-stage hybrid model for hydrological time series forecasting". *PLOS ONE*, vol.9, no.8, Article ID e104663.
- Dibike** Y. B. and Solomatine D. P., (2001). "River Flow Forecasting Using Artificial Neural Networks", *Journal of Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 26(1), 1-8.
- Espinoza** J.C., Ronchail J., Frappart F., Lavado W., Santini W., Guyot J. L. (2013). "The major floods in the Amazonas River and tributaries (Western Amazon basin) during the 1970- 2012 period: A focus on the 2012 flood". *Journal of Hydrometeorology*.
- Haykin** S., (1999). "Neural Networks: A Comprehensive Foundation", 2 edn. New Jersey: Prentice Hall.
- Kim** T.-W. and Valdés J. B., (2003). "Nonlinear Model for Drought Forecasting Based on a Conjunction of Wavelet Transforms and Neural Networks", *J. Hydrol. Eng.*, 8:319-328.
- Kisi** O., (2004b). "Multi-layer perceptrons with Levenberg-Marquardt optimization algorithm for suspended sediment concentration prediction and estimation". *Hydrol. Sci. J.* 49(6), 1025-1040.
- Krishna** B., Satyaji Rao Y. R. and Nayak P. C. (2011). "Time Series Modeling of River Flow Using Wavelet Neural Networks", *Journal of Water Resource and Protection*, 3: 50-59.
- Lavado** W., Labat D., Ronchail J., Espinoza J. C., Guyot J. L. (2012). "Trends in rainfall and temperature in the Peruvian Amazon-Andes basin over the last 40 years (1965-2007)". Accepted in *Hydrological Processes*.

- Maier** H.R. and Dandy G.C., (2000). "Neural networks for the prediction and forecasting of water resources variables: A review of modelling issues and applications". *Environ. Modell. Softw.*, 15, 101-124.
- Mashor** M. Y., (2002). "On-line short-term streamflow forecasting using neural networks", *Friend 2002 regional hydrology: bridging the gap between research and practice*, IAHS publication 274: 8.
- Nourani** V., Hosseini Baghanam A., Adamowski J., and Kisi O. (2014). "Applications of hybrid wavelet–Artificial Intelligence models in hydrology: A review". *Journal of Hydrology* 514, 358-377.
- Pandey** A. S., Singh D., and Sinha S. K., (2010). "Intelligent hybrid wavelet models for short-term load forecasting", *IEEE Trans. on power syst.*, vol. 25, pp. 1266-1273.
- Pramanik** N., Panda R. K., and Singh A., (2011). "Daily river flow forecasting using wavelet ANN hybrid models", *Journal of Hydroinformatics*, vol. 13, no. 1, pp. 49–63.
- Sang** Y. F., (2012). "A practical guide to discrete wavelet decomposition of hydrologic time series", *Water Resources Management*, vol. 26, no. 11, pp. 3345–3365.
- Santos** C.A.G., Freire P.K.M.M., Silva G.B.L., Silva R.M., (2014). "Discrete wavelet transform coupled with ANN for daily discharge forecasting into Três Marias reservoir", *Int. Assoc. of Hydr. Sc.* 364, Bologna, Italy, pp. 100-105.
- Satyaji Rao** Y. R., Krishna B. and Venkatesh B., (2014). "Wavelet Based Neural Networks for Daily Stream Flow Forecasting", *Intern. J. of Em. Tech. and Adv. Eng.*, Vol. 4, Issue 1, ISSN 2250-2459.
- Shrestha** R.R. and Nestmann F., (2009). "Physically based and data-driven models and propagation of input uncertainties in river flood prediction". *J. Hydrol. Eng.*, 14, 1309–1319.
- Wang** W., (2006). "Stochasticity, Nonlinearity and Forecasting of Streamflow Processes", IOS Press: Amsterdam, The Netherlands.
- Wang** D. and Ding J., (2003). "Wavelet Network Model and Its Application to the Prediction of Hydrology", *Nature and Science*, Vol. 1, No. 1, pp. 67-71.
- Wang** W.C., Chau K.W., Cheng C.T. and Qiu L., (2009). "A comparison of performance of several artificial intelligence methods for forecasting monthly discharge time series", *Journal of Hydrology* 374, 294-306.
- Wu** C.L., Chau K.W., Li Y.S., (2009). "Methods to improve neural network performance in daily flows prediction". *Journal of Hydrology* 372, 80-93.
- Zhang** F., Dai H., Tang D., (2014). "A Conjunction Method of Wavelet Transform-Particle Swarm Optimization-Support Vector Machine for Streamflow Forecasting", *J. App. Math.*, 910196:1-910196:10.

# CAPÍTULO 3

## BIORESTORATION OF AN AGRICULTURAL SOIL IMPACTED BY WASTE MOTOR OIL

Data de submissão: 16/01/2023

Data de aceite: 10/02/2023

### **Montserrat Torres-Olaya**

Environmental Microbiology Laboratory  
Chemical-Biological Research Institute  
Universidad Michoacana de  
San Nicolás de Hidalgo<sup>1</sup>  
Morelia, Michoacan, Mexico

### **Juan Luis Ignacio-De la Cruz**

Environmental Microbiology Laboratory  
Chemical-Biological Research Institute  
Universidad Michoacana de  
San Nicolás de Hidalgo  
Morelia, Michoacan, Mexico  
<https://orcid.org/0000-0002-5638-3720>

### **Gabriel Gallegos-Morales**

Department of Parasitology  
Universidad Autónoma Agraria  
Antonio Narro  
Saltillo, Coahuila, Mexico

### **Juan Manuel Sánchez-Yáñez<sup>2</sup>**

Environmental Microbiology Laboratory  
Chemical-Biological Research Institute  
Universidad Michoacana de  
San Nicolás de Hidalgo  
Morelia, Michoacan, Mexico  
<https://orcid.org/0000-0002-1086-7180>

<sup>1</sup> Environmental Microbiology Laboratory, Chemical-Biological Research Institute, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Calle Fco J Mujica S/N, Col Felicitas del Rio, ZP 58,000, Morelia, Michoacan, Mexico;

<sup>2</sup> Corresponding author.

**ABSTRACT:** Soil impacted by 50,000 ppm of hydrocarbon mixtures such as waste motor oil (WMO) exceeds the maximum allowable concentration of 4,400 ppm established by the Mexican environmental standard NOM-138-SEMARNAT-2003. Soil impacted by 50,000 ppm of WMO, it causes loss of fertility. The objectives of this work were: a) biostimulation of the soil impacted by 50,000 ppm WMO, with detergent and mineral solution b) phytoremediation by sowing *Phaseolus vulgaris* and *Zea mays* with *Bacillus licheniformis* and *Rhizobium etli* to reduce the concentration of WMO to a value lower than the maximum allowed by NOM-138-SEMARNAT-2003. This agricultural soil contaminated by WMO was biostimulated and phytoremediated, then the initial and final concentration of WMO was determined by Soxhlet experimental data were analyzed with ANOVA/Tukey (P<0.05). The results indicated that biostimulation of soil impacted by 50,000 ppm WMO decreased to 30, 378 ppm in 30 days; indicating that mineral solution induced aerobic heterotrophic microorganisms to mineralize the WMO, increase in the microbial density oxidizing the WMO with  $13.7 \times 10^6$  CFU/g dry soil, a statistically different numerical value compared to the population that oxidized the WMO with  $13.2 \times 10^5$  CFU/g dry soil of the soil without biostimulation or negative control. Subsequently, phytoremediation with *P. vulgaris* and *Z. mays* with *B. licheniformis* and *R. etli* at physiological maturity of both plants,

reduced the concentration of 30,378 ppm of WMO remaining after biostimulation to 700 ppm and 900 ppm of WMO respectively; both values were lower than the maximum allowed by NOM-138-SEMARNAT-2003. It is concluded that biostimulation of soil impacted by WMO followed by phytoremediation is a sustainable strategy for the removal it to a concentration found in soil not impacted by hydrocarbons, due this soil can be reused in agricultural production.

**KEYWORDS:** Soil. Hydrocarbons. Plants. *Endophytic bacteria*. Mineralization.

## 1 INTRODUCTION AND BACKGROUND

Modern agriculture is based on the use of fossil fuels with machinery for preparing the soil and harvesting agricultural crops, which causes spills of gasoline and mixtures of aliphatic and aromatic hydrocarbons [1] such as waste motor oil (WMO). Soil contamination by WMO is a serious environmental problem, since it is also a product of the lubrication of automobiles. In Mexico, it is estimated that more than 325 million liters of WMO are generated, most of which are dumped into the soil, cause contamination by preventing gas exchange, water diffusion, and inhibition of aerobic heterotrophic microbiota activity [2], with economic losses due to decreased agricultural production [3]. According to the General Law of Ecological Balance and Environmental Protection [4], WMO is a hazardous waste, while the official Mexican standard NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2003 [5] establishes that the maximum concentration of hydrocarbons in permitted soil it is 4,400 ppm divided into 3 light fractions with 200 ppm, the medium with 1,200 ppm and the heavy with 3,000 ppm. One option for the elimination of WMO in an agricultural soil is biostimulation and phytoremediation. Generally, these biological strategies are applied to soils impacted by hydrocarbons such as WMO individually as the main option to solve this problem that negatively affects agricultural production [6]. Consequently, a sustainable option for this soil is to start biostimulation by applying a detergent that rapidly solubilizes the WMO, followed by a mineral solution that equilibrates the C:N ratio and induces a drastic decrease in the WMO concentration and concluding with sowing of plants that, being tolerant to WMO, eliminate it in a relatively short time, an action known as phytoremediation. The activity of these plants to destroy WMO could be enhanced by genera and species of growth-promoting bacteria such as *Bacillus licheniformis* and *Rhizobium etli* are also applied, with the ability to eliminate WMO, it is possible to decrease its concentration to a value below the maximum established by NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2003 [5]. Therefore, the objectives of this research were: a) biostimulation of soil impacted with 50,000 ppm WMO, with a detergent and mineral solution, followed by b) phytoremediation by sowing *Phaseolus vulgaris* and *Zea mays* inoculated with *Bacillus*

*licheniformis* and *Rhizobium etli*, to reduce the WMO to a value below the maximum allowed by NOM-138-SEMARNAT-2003.

## 2 MATERIALS AND METHODS

### 2.1 SITE DESCRIPTION

This research was carried out in the greenhouse of the Environmental Microbiology Laboratory with a surface area of 10 X 10 m<sup>2</sup>, where the microclimatic conditions were: temperature of 23.2°C, luminosity of 450  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  and relative humidity of 67%. For the experiment, soil was collected from an agricultural field called “La Cajita” belonging to Tenencia Zapata, municipality of Morelia, Mich., Mexico located at 19° 39' 27" north latitude, 100° 19' 59" west longitude and at an altitude of 1820 m above sea level.

### 2.2 BIOSTIMULATION OF SOIL IMPACTED BY 50,000 PPM OF WASTE MOTOR OIL WITH DETERGENT AND MINERAL SOLUTION

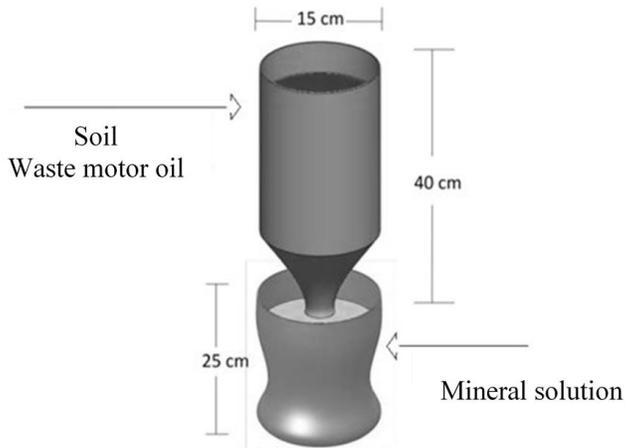
The soil was initially sieved with a No. 20 mesh and then solarized at 70 °C/48 h to eliminate pest and disease problems [7]. The soil was then artificially contaminated with 50,000 ppm WMO obtained from a mechanical workshop in Morelia, Mich, Mexico. Then 1.0 g of the soil with WMO was weighed and placed on top of Leonard jars as shown in Figure 1, where it was biostimulated with commercial detergent at 1% (w/v) and with mineral solution contained in the reservoir at the bottom; both parts were connected with a 20 cm cotton strip to facilitate the movement of water or mineral solution by capillarity to the soil. The research was conducted with an experimental design of 3 treatments and 6 replicates in 2 phases: i) biostimulation of soil impacted by 50,000 ppm WMO with mineral solution with the following chemical composition (g/L): NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 10.0; K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> 2.5; KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 2.0; MgSO<sub>4</sub> 1.0; NaCl 0.1; CaCl<sub>2</sub> 0.1; FeSO<sub>4</sub> traces and 10.0 mL/L of oligoelement solution with the following composition (g/L): H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> 2.86, ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 0.22; MnCl<sub>2</sub>·7H<sub>2</sub>O 1.81; K<sub>2</sub>MnO<sub>4</sub> 0.09; the solution was adjusted to pH 7.0 [8, 9]. 20 mL of mineral solution was added for 30 days for WMO mineralization. At the end of biostimulation, 15 g of soil was collected and WMO concentration was quantified by Soxhlet.

### 2.3 PHYTOREMEDIATION OF SOIL IMPACTED BY WASTE MOTOR OIL WITH PHASEOLUS VULGARIS AND ZEA MAYS PLUS BACILLUS LICHENIFORMIS AND RHIZOBIUM ETLI

In this phase, a phytoremediation complementary to the biostimulation of the agricultural soil was carried out to reduce the remaining WMO to a concentration below

the maximum accepted by NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2003 [5]. To inoculate the seeds of *P. vulgaris* and *Z. mays*: first, *B. licheniformis* (from the collection of the Environmental Microbiology Laboratory of the Institute of Chemical and Biological Research of the UMSNH) was grown on nutrient agar with the following composition (g/L): casein peptone 5.0; yeast extract 3.0; 18 (pH 7.0); while *R. etli* was grown on mannitol agar and congo red yeast extract with the following composition (g/L): mannitol 10;  $K_2HPO_4$  0.5;  $MgSO_4$  0.2; congo red solution 1:400 10 mL; NaCl 0.1; yeast extract 10; agar 18; pH adjusted to 6.8. When both *B. licheniformis* and *R. etli* were ready to be used on the seeds of the indicated plants, 1.0 mL of each bacterial genus was taken, equivalent to a cell concentration of  $1.5 \times 10^6$  CFU/g of *B. licheniformis* and *R. etli* calculated by viable plate count on yeast mannitol agar and nutrient extract and congo agar respectively. Then, for every 10 seeds of *P. vulgaris* and *Z. mays*, each was inoculated with 1.0 mL of *B. licheniformis* and *R. etli*; 4 seeds of *P. vulgaris* and 4 seeds of *Z. mays* treated with *B. licheniformis* and *R. etli* were immediately taken and sown in agricultural soil with the rest of the WMO. To demonstrate that phytoremediation reduced the remaining WMO concentration in the agricultural soil, the following response variables were used: germination percentage 8 days after planting, as well as phenology and biomass of *P. vulgaris* and *Z. mays* at physiological maturity 60 days after sowing; according to numerical values of plant height (PH) and root length (RL); as well as the values of the fresh weight of the leaf and root part of each plant (FTW); likewise, for the dry weight of leaves and roots of both plants (DTW), they were dried in an oven at 70 °C /24h. The numerical values of *P. vulgaris* and *Z. mays* inoculated with *B. licheniformis* and *R. etli* were compared with the equivalents of *P. vulgaris* and *Z. mays* without inoculation in agricultural soil or WMO irrigated only with water or absolute control (AC), as well as with the same numerical values of *P. vulgaris* and *Z. mays* in soil impacted by WMO, fed with mineral solution, without *B. licheniformis* and *R. etli* considered as negative control (NC). In addition, at the end of phytoremediation, 15 g of soil were taken and the final WMO concentration was determined by the Soxhlet method [10]. All numerical values from this experiment were subjected to analysis of variance (ANOVA) with the Tukey HSD mean test ( $P < 0.05$ ) and the statistical programme Statgraphics centurion [11].

Figure 1. Design diagram of Leonard jar.



### 3 RESULTS AND DISCUSSION

Table 1 shows the WMO-mineralizing bacterial population in the soil biostimulated by detergent and mineral solution. The results indicate that in the soil uncontaminated with WMO, irrigated only with water or AC, the native microbial population recorded a value of  $97.31 \times 10^4$  CFU/g dry soil in response to the addition of water and the absence of WMO [12]. On the contrary, in the soil impacted by 50,000 ppm WMO biostimulated with detergent and mineral solution, the bacterial density recorded  $13.7 \times 10^6$  CFU/g dry soil, indicating that the initial biostimulation with detergent solubilized part of the WMO, while the mineral solution enriched the soil with nutrients such as N, P and K, which induced a higher density of the autochthonous heterotrophic aerobic hydrocarbon oxidizing, and therefore, the WMO concentration was decreased [13]. The  $97.31 \times 10^4$  CFU/g dry soil recorded in the AC soil and the  $13.7 \times 10^6$  CFU/g dry soil recorded in the soil impacted with WMO biostimulated with detergent and mineral solution, had a statistical difference compared to the value of the WMO oxidizing bacterial population of  $13.2 \times 10^5$  CFU/g dry soil, recorded in the soil impacted by WMO without biostimulation or NC, indicating that the phytotoxic compounds of WMO inhibited the activity of the aerobic heterotrophic native bacterial population, which also lacked the essential minerals of biostimulation to decrease the concentration of WMO [14].

Table 1. Bacterial population able to oxidize 50,000 ppm waste motor oil in soil biostimulated with detergent and mineral solution.

Soil*	CFU/g dry soil
Absolute control: water (AC)	$97.3 \times 10^{4c**}$
Negative control: waste motor oil (NC)	$13.2 \times 10^{5b}$
Treatment: waste motor oil + detergent + mineral solution	$13.7 \times 10^{6a}$

\*Number of replicates (n) =3; \*\* values with different letters indicate statistical difference according to ANOVA/Tukey (P<0.05).

Table 2 shows the biostimulation of soil impacted by 50,000 ppm WMO with detergent and mineral solution, where the concentration of WMO after 30 days was reduced to 30,378 ppm by the action of biostimulation with the detergent that solubilized some carbon hydrocarbons from the WMO and made them available for aerobic heterotrophic microorganisms to initiate partial mineralization of the WMO. Then the application of the mineral solution with the main macroelements of the type  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  and  $\text{K}_2\text{HPO}_4/\text{KH}_2\text{PO}_4$  enriched and adjusted the soil imbalance, and induced the native hydrocarbon oxidizing microbiota to decrease WMO by up to 39.29% [15, 16]. In contrast, in soil without biostimulation or NC, natural attenuation did not reduce WMO, as the excess of this hydrocarbon mixture inhibited aerobic heterotrophic soil bacterial activity to remove WMO [17].

Table 2. Concentration of waste motor oil remaining after 30 days of biostimulation with detergent and mineral solution.

Soil*	Initial concentration WMO (ppm)	Final concentration WMO (ppm)	Percentage (%) of mineralization WMO	Remaining WMO (%)
Absolute control: water (AC)	0 <sup>d**</sup>	0 <sup>d</sup>	0 <sup>d</sup>	0 <sup>d</sup>
Negative control: waste motor oil (NC)	50,000 <sup>a</sup>	40,000 <sup>a</sup>	20 <sup>b</sup>	80 <sup>a</sup>
Treatment: waste motor oil + detergent + mineral solution	50,000 <sup>a</sup>	30,378 <sup>b</sup>	39.29	60.75 <sup>b</sup>

\*n =4; \*\* values with different letters indicate statistical difference according to ANOVA/Tukey (P<0.05). WMO=Waste motor oil.

Table 3 shows 41.66% germination of *P. vulgaris* in soil not contaminated by WMO, irrigated with water used as AC; this numerical value was statistically different compared to 79.16% germination of *P. vulgaris* enhanced with *B. licheniformis* and *R. etli* in soil impacted by 30,378 ppm WMO. This indicates that the remaining WMO after biostimulation did not inhibit the germination of *P. vulgaris*, nor the beneficial activity of *B. licheniformis* and *R. etli*, as both bacteria converted seed exudates into phytohormones that made seed germination possible [18, 19]. The 41.66% germination recorded in *P. vulgaris* in AC soil was statistically different in relation to the 66.6% germination of *P. vulgaris* in a soil impacted by 50,000 ppm WMO without biostimulation used as NC, indicating that the percentage decrease in germination of *P. vulgaris* was due to excess WMO [20].

Table 3. Percent germination of *P. vulgaris* with *B. licheniformis* and *R. etli* during phytoremediation of soil impacted by 30,378 ppm of waste motor oil.

<i>P. vulgaris</i> in soil*	Germination percentage (%)
Absolute control: water (AC)	41.66 <sup>c**</sup>
Negative control: 40,000 ppm waste motor oil (NC)	66.6 <sup>b</sup>
Treatment 1: 30,378 ppm waste motor oil + detergent + mineral solution + seed inoculation with <i>B. licheniformis</i> and <i>R. etli</i>	79.16 <sup>a</sup>

\*n =6; \*\* values with different letters indicate statistical difference according to ANOVA/Tukey (P<0.05).

Table 4 shows that *Z. mays* seeds with *B. licheniformis* and *R. etli* in soil impacted by 30,378 ppm WMO, recorded 87.5% germination after 8 days, suggesting that both *B. licheniformis* and *R. etli* converted seed exudates into phytohormones for a higher germination percentage of *Z. mays*. Furthermore, this result shows that biostimulation using the detergent was sufficient to solubilize WMO and avoid a toxic effect on seeds, while biostimulation with mineral solution was useful for *Z. mays* germination as it adjusted the C:N imbalance in the soil impacted by WMO [9]. The numerical value of *Z. mays* with *B. licheniformis* and *R. etli* at this stage was statistically different compared to that for *Z. mays* with 54.16% germination in the soil used as AC, indicating that irrigation was not sufficient to break embryo dormancy and induce better germination of *Z. mays* [21], while 70.83% germination of *Z. mays* in soil impacted by 50,000 ppm WMO or NC supports that the hydrophobic properties of WMO partially reduced both water and nutrient exchange indispensable for germination [22].

Table 4. Percent germination of *Z. mays* with *B. licheniformis* and *R. etli* during phytoremediation of soil impacted by 30,378 ppm of waste motor oil remaining after biostimulation.

<i>Z. mays</i> in soil*	Percentage of germination (%)
Absolute control: water (AC)	54.16 <sup>c**</sup>
Negative control: 40,000 ppm waste motor oil (NC)	70.83 <sup>b</sup>
Treatment 2: 30,378 ppm waste motor oil + detergent + mineral solution + seed inoculation with <i>B. licheniformis</i> and <i>R. etli</i>	87.5 <sup>a</sup>

\*n =6; \*\* values with different letters indicate statistical difference according to ANOVA/Tukey (P<0.05).

Table 5 shows the phenology of *P. vulgaris* at physiological maturity enhanced with *B. licheniformis* and *R. etli* in soil impacted with WMO biostimulated with detergent and mineral solution; there it recorded 23.25 cm plant height (PH) and 29.5 cm root length (RL); in *P. vulgaris* planted in soil without WMO irrigated with water or AC, it recorded 23.37 cm PH and 28.87 cm RL. These numerical values showed statistical difference when

compared with the 16.5 cm PH and 23.25 cm RL of *P. vulgaris* grown in soil impacted with WMO without biostimulant. This suggests that, *B. licheniformis* and *R. etli* transformed root exudates into plant growth-promoting compounds that induced *P. vulgaris* development and root proliferation, which improved its tolerance to phytotoxicity [23]. In relation to fresh biomass, *P. vulgaris* in soil not contaminated by WMO or AC recorded 1.41 g total fresh weight (TFW), while *P. vulgaris* in soil contaminated with 40,000 ppm of WMO without biostimulant used as NC, recorded 1.36 g TFW; both values had statistical difference in comparison with the 1.12 g TFW of *P. vulgaris* inoculated with *B. licheniformis* and *R. etli* planted in soil contaminated by 30,387 ppm of biostimulated WMO. While in dry biomass, *P. vulgaris* in soil used as AC recorded 0.17 g total dry weight (TDW); *P. vulgaris* in soil with 40,000 ppm WMO used as NC recorded 0.13 g TDW. These values showed statistical difference compared with the 0.2 g TFW of *P. vulgaris* enhanced with *B. licheniformis*/*R. etli* planted in soil contaminated by 30,387 ppm of biostimulated WMO. This indicates that the 30,378-ppm concentration of WMO remaining after biostimulation did not affect the healthy growth of *P. vulgaris* [24]; furthermore, when inoculated with *B. licheniformis* and *R. etli*, these bacteria were able to convert the radical exudates into phytohormones. Simultaneously *B. licheniformis*/*R. etli* were able to mineralize WMO aromatics at the rhizosphere level, as has been reported by Lopez-Ortiz *et al.*, 2012 [9] who, in agricultural soils impacted by naphthalene and phenanthrene, applied phytoremediation using *Leucaena leucocephala* inoculated with *Rhizobium tropici*, where a higher biomass was recorded despite the high concentration of hydrocarbons, than when *L. leucocephala* was not inoculated with *R. tropici*.

Table 5. Phenology and biomass of *P. vulgaris* with *B. licheniformis* and *R. etli* during phytoremediation of soil impacted by 30,387 ppm of waste motor oil remaining after biostimulation.

<i>P. vulgaris</i> in soil*	Plant height (cm)	Root length (cm)	Total fresh weight (g)	Total dry weight (g)
Absolute control: water (AC)	23.37 <sup>a**</sup>	28.87 <sup>a</sup>	1.41 <sup>a*</sup>	0.17 <sup>b</sup>
Negative control: 40,000 ppm waste motor oil (NC)	16.5 <sup>b*</sup>	23.25 <sup>b</sup>	1.36 <sup>b</sup>	0.13 <sup>c</sup>
Treatment 1: 30,387 ppm waste motor oil + detergent + mineral solution + inoculation of seeds with <i>B. licheniformis</i> and <i>R. etli</i> .	23.25 <sup>a</sup>	29.5 <sup>a</sup>	1.12 <sup>c</sup>	0.2 <sup>a</sup>

\*n =6; \*\* values with different letters indicate statistical difference according to ANOVA/Tukey (P<0.05).

Table 6 shows the phenology of *Z. mays* at physiological maturity enhanced with *B. licheniformis* and *R. etli* planted in soil impacted by 30,387 ppm of WMO biostimulated with detergent and mineral solution, where a PH of 29.5 cm was recorded. This numerical

value presented a statistical difference in comparison with the 13.5 cm PH of *Z. mays* cultivated in soil not contaminated by WMO and irrigated with water used as AC, as well as with the 35.7 cm PH of *Z. mays* planted in soil impacted by 40,000 ppm WMO without biostimulation or NC. Numerical phenology data when *Z. mays* were enhanced with *B. licheniformis*/*R. etli* suggest that the bacteria transformed seed and root exudates into phytohormones that enhanced the tolerance of *Z. mays* to the phytotoxic effect of WMO [25]. On the other hand, *Z. mays* with *B. licheniformis* and *R. etli* in soil with 30,387 ppm biostimulated WMO, recorded 31 cm RL, a statistically different value in relation to the 29.7 cm RL of *Z. mays* grown in uncontaminated soil with WMO used as AC, and to the 25 cm RL of *Z. mays* in soil impacted by 40,000 ppm WMO used as NC. In fresh biomass, *Z. mays* with *B. licheniformis*/*R. etli* in soil impacted by 30,378 ppm biostimulated WMO recorded 0.70 g TFW, while *Z. mays* in soil uncontaminated by WMO used as AC recorded 0.41 g TFW. Both numerical values presented statistical differences compared to the 1.44 G TFW of *Z. Mays* in soil impacted by 40,000 ppm WMO not biostimulated referred to as NC. In dry biomass, *Z. mays* with *B. licheniformis* and *R. etli* in soil impacted by 30,378 ppm of biostimulated WMO recorded 0.15 g TFW, a value similar to that recorded in *Z. mays* grown in soil with WMO without biostimulant. The above showed that the biomass of *Z. mays* despite being inoculated with *B. licheniformis*/*R. etli* was negatively affected due to the remaining concentration of WMO after biostimulation. This is possible because the fraction of WMO limited water uptake and gas exchange by the formation of a hydrophobic layer, which caused inhibition of root growth [24].

Table 6. Phenology and biomass of *Z. mays* with *B. licheniformis* and *R. etli* during phytoremediation of soil impacted by 30,387 ppm of waste motor oil remaining after biostimulation.

<b>Z. mays in soil*</b>	<b>Plant height (cm)</b>	<b>Root length (cm)</b>	<b>Total fresh weight (g)</b>	<b>Total dry weight (g)</b>
Absolute control: water (AC)	13.5 <sup>c**</sup>	29.7 <sup>b</sup>	0.41 <sup>c</sup>	0.11 <sup>b</sup>
Negative control: 40,000 ppm waste motor oil (NC)	35.7 <sup>a</sup>	25 <sup>c</sup>	1.44 <sup>a</sup>	0.15 <sup>a</sup>
Treatment 2: 30,387 ppm waste motor oil + detergent + mineral solution + inoculation of seeds with <i>B. licheniformis</i> and <i>R. etli</i> .	29.5 <sup>b</sup>	31 <sup>a</sup>	0.70 <sup>b</sup>	0.15 <sup>a</sup>

\*n =6; \*\* values with different letters indicate statistical difference according to ANOVA/Tukey (P<0.05).

Table 7 shows the WMO concentration at the end of agricultural soil biostimulation and phytoremediation; when *P. vulgaris* was sowed with *B. licheniformis* and *R. etli* at physiological maturity level, the maximum decrease of WMO from 30,378 ppm to 700

ppm in 60 days was detected; while *Z. mays* with *B. licheniformis* and *R. etli* reached a decrease from 30,370 ppm to 900 ppm WMO in 60 days. Both numerical values of WMO concentration were lower than the maximum level accepted by NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2003 [5]. This fact shows that both *B. licheniformis* and *R. etli* increased the mineral uptake capacity of *P. vulgaris* and *Z. mays* roots, and at the same time *B. licheniformis* and *R. etli* were able to mineralize WMO aromatic used as a carbon and energy source; this increased the phytodegradation capacity of *P. vulgaris* and *Z. mays* roots to decrease the concentration value of remaining WMO in agricultural soil to a concentration value below the maximum accepted by NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2003 which ensured that this soil could be reused for agricultural production [5, 26].

Table 7. Concentration of waste motor oil, after biostimulation with detergent and mineral solution, and phytoremediation by *P. vulgaris* and *Z. mays*.

Soil*	Initial concentration WMO (ppm)	Final concentration WMO (ppm)	Percentage (%) of mineralization WMO	Remaining WMO (%)
Absolute control: water (AC)	0 <sup>d**</sup>	0 <sup>d</sup>	0 <sup>d</sup>	0 <sup>d</sup>
Negative control: 40,000 ppm waste motor oil (NC)	50,000 <sup>a</sup>	40,000 <sup>a</sup>	20 <sup>c</sup>	80 <sup>a</sup>
Treatment 1: 30,387 ppm waste motor oil + detergent + mineral solution + <i>P. vulgaris</i> with <i>B. licheniformis</i> and <i>R. etli</i>	50,000 <sup>a</sup>	700 <sup>c</sup>	98.6 <sup>a</sup>	1.4 <sup>c</sup>
Treatment 2: 30,387 ppm waste motor oil + detergent + mineral solution + <i>Z. mays</i> with <i>B. licheniformis</i> and <i>R. etli</i>	50,000 <sup>a</sup>	900 <sup>c</sup>	98.2 <sup>a</sup>	1.8 <sup>b</sup>

\*n =4; \*\* values with different letters indicate statistical difference according to ANOVA/Tukey (P<0.05). Waste motor oil (WMO).

## 4 CONCLUSION

The use of fossil fuels in agriculture has caused the contamination of agricultural soil by WMO that contributes to climate change due the loss of plant productivity. This demands an alternative sustainable solution such as biostimulation and phytoremediation that allows the reuse of soil without risk to human, animal and plant health.

## 5 ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank the Project 2.7 (2023) 'Probiotic microorganisms from plants and other sources for the restitution of the productive agricultural capacity of a soil

contaminated by hydrocarbons' of the Coordination of Scientific Research of the UMSNH and Phytonutrientes de México and BIONUTRA, S. A. Maravatio, Mich., Mexico.

## 6 CONFLICT OF INTEREST STATEMENT

The participants in this research assure that there is no conflict of interests related to the planning, execution and reporting of this research that compromises the value of the results obtained or their consequences in scientific, technical, or any other type of terms.

## REFERENCES

1. Akpabio, G. T., Udoinyang, I. E. y Basil, T. S. 2017, *J. Nat. Sci. Res*, 5, 22.
2. Escobar-Alvarado, L. F., Vaca-Mier, M., López, R. y Rojas-Valencia, M. N. 2018, *Bulletin of Env. Con. and Tox*, 100, 280.
3. Abdulyekeen, K. A., Aliyu, A., Abdulkarim, A. Y., Salis, A. y Abdulkarim, A. S. 2019, *J. of Env. Eng and Stud*, 4, 11.
4. *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*. 2008, DOF.
5. Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SS-2003.
6. Helena, I. N. y Uchechukwu, O. F. 2018, *African J. of Env. and Nat. Sci. Res*, 1, 10.
7. Hernández M, CA. 2010, *Lámpsakos*, 4, 12.
8. Barrios-Ziolo, L. F., Robayo-Gómez, J., Prieto-Cadauid, S. y Cardona-Gallo, S. A. 2015, *Revista Cintex*, 20, 69.
9. López-Ortiz, C., Ferrera-Cerrato, R., Alarcón, A., Almaraz, J. J., Martínez-Romero, E. y Mendoza-López, M. A. 2012, *Rev. Int. Con. Amb*, 28, 333.
10. Haghollahi, A., Fazaelpoor, M. H. y Schaffie, M. 2016, *J. of Env. Man*, 180, 197.
11. Ayotamuno, J. M., Kogbara, R. B. y Agoro, O. S. 2009, *World J. of Micro. and Bio*, 25, 1567.
12. Dos Reis Antunes, G., Da Silva, T. R., Carvalho, B. R., Neiva, J. N. M., De Araújo, G. G. L. y Júnior, P. I. F. 2017, *Revista Geama*, 261.
13. Silva-Castro, G. A., Rodriguez-Calvo, A., Laguna, J., González-López, J. y Calvo, C. 2016, *Int. Biodeterioration & Biodegradation*, 108, 91.
14. Ramadass, K., Megharaj, M., Venkateswarlu, K. y Naidu, R. 2018, *Sci. of The Total Env*, 636, 968.
15. Infante, C., Ortega, C., Morales, F., Ehrmann, U., Hernández-Valencia, I. y Pérez, R. 2010, *Bioagro*. 22, 145.
16. Pucci, G., Acuña, A. y Pucci, O. 2015, *Rev. Per. de Bio*, 22, 97.

17. Castro-Mancilla, Y. V., Castro-Meza, B. I., de la Garza-Requena, F. R., Rivera-Ortiz, P., Heyer-Rodríguez, L. y Ortiz-Carrizales, Y. P. 2013, *Terra Lat*, 31, 221.
18. Al-Baldawi, I. A., Abdullah, S. S., Anuar, N. y Mushrifah, I. 2017, *Int. J. of Env. Sci. and Technology*, 14, 75.
19. Lebrazi, S. y Fikri-Benbrahim, K. 2018, *Leg. S. H. and Sus. Man*, 205.
20. Xi, Y., Liu, H., Johnson, D., Zhu, C., Xiang, J. y Huang, Y. 2019, *J. of Soils and Sed*, 19, 2823.
21. Daryabeigi Zand, A. y Hoveidi, H. 2018, *Int. J. of Env. Res*, 12, 327.
22. He, W., Megharaj, M., Wu, C. Y., Subashchandrabose, S. R. y Dai, C. C. 2020, *C. Rev. in Bio*, 40, 31.
23. Prakash, G., Soni, R., Mishra, R. y Sharma, S. 2019, Springer, Singapore, 83.
24. Asghar, H. N., Rafique, H. M., Khan, M. Y. y Zahir, Z. A. 2017, *Soil and Sed. Con: An Int J*, 26, 749.
25. Grifoni, M., Rosellini, I., Angelini, P., Petruzzelli, G. y Pezzarossa, B. 2020, *Env. Pollution*, 265, 114950.
26. Csutak, O., Simon Gruiță, A., Corbu, V., Constantin, N., Pojoga, D., Vassu, T. y Georgiana, D. C. 2017, *Sci Bull. Series F. Biotechnol*, 21, 183.

# CAPÍTULO 4

## CARBONO ORGÁNICO SECUESTRADO EN SISTEMAS AGROFORESTALES EVALUADOS EN EL CANTÓN MEJÍA, PICHINCHA, ECUADOR

Data de aceite: 27/02/2023

### R. A. Ramos Veintimilla<sup>1</sup>

Escuela de Ingeniería Forestal  
Facultad de Recursos Naturales  
Escuela Superior Politécnica de  
Chimborazo. Panamericana Sur km 1½  
Riobamba, Ecuador. EC060155

### C. M. Nieto Cabrera

Profesor Agroecología  
Facultad de Ciencias Agrícolas  
Universidad Central del Ecuador

### J. R. Limongi Andrade

Investigador privado

### F. M. Romero Mancero

Agencia Ecuatoriana de  
Aseguramiento de la Calidad del Agro  
Distrito 3 Riobamba

**RESUMEN:** Este trabajo se ejecutó en la Estación Experimental Santa Catalina del INIAP-Ecuador, ubicada a 3050 m de altitud, 12 °C de temperatura promedio y 1 200 mm de precipitación anual. Los suelos corresponden al orden Andisoles. El propósito fue determinar

el potencial de fijación y almacenamiento de carbono en dos sistemas agroforestales aptos para la sierra ecuatoriana, plantados en 1995, en comparación con un sistema a campo abierto, para generar referencias útiles para el cambio de uso del suelo de sistemas convencionales a sistemas sostenibles y amigables con el ambiente. Los SAF estudiados fueron: 1) *Acacia melanoxylum* L. y *Buddleja incana* Ruiz y Pavón; y 2) *Alnus acuminata* O. Ktze y *Sparteum junceum* L. Cada Sistema, estuvo formado de dos hileras de árboles de 30 m de largo, con 30 árboles y 30 arbustos, separados en forma alternada a 1 m dentro de hileras y a 2 m entre hileras, en el espacio entre las hileras de árboles y arbustos se evaluaron tres opciones de pastos. Del mismo modo, a un metro de la línea de árboles, a los dos costados externos de las barreras se sembraron parcelas con cultivos andinos. Las variables evaluadas fueron: densidad aparente de suelo, Carbono Orgánico total en el suelo, carbono en el mantillo debajo del sistema y en la biomasa aérea de las especies arbóreas y arbustivas. Para estimar la biomasa aérea de las especies arbóreas se utilizaron dos modelos alométricos. El carbono almacenado, en los primeros 12 años, en el Sistema A. *melanoxylum* y *B. incana* fue 13 % superior (168,49 t ha<sup>-1</sup>) al almacenado en el Sistema con *A. acuminata* y *S. junceum* (148,93 t ha<sup>-1</sup>) y 38 % más que el sistema agrícola a campo abierto (122,22 t ha<sup>-1</sup>). Alrededor del 75 % del carbono almacenado en los SAF evaluados se

<sup>1</sup> Correspondencia, móvil 0999110240, raul.ramos@esPOCH.edu.ec (R. A. Ramos Veintimilla)

encuentra en la capa superficial del suelo (0,2 m), ésta característica indica la importancia del cuidado que se debe tener con el recurso suelo para evitar la erosión y la oxidación del carbono almacenado.

**PALABRAS CLAVES:** Secuestro de carbono. Servicio ambiental. Sistema agroforestal.

## ORGANIC CARBON SEQUESTRATION IN AGROFORESTRY SYSTEMS EVALUATED IN MEJÍA CANTON, PICHINCHA, ECUADOR

**ABSTRACT:** This work was carried out in the Santa Catalina Experimental Station of the INIAP-Ecuador, located at an altitude of 3 050 meters, with an average temperature of 12°C and 1 200 mm of annual precipitation. The soils belong to the Andisols order. The purpose of this work was to determine the potential of carbon placement and storage in two agroforestry systems of the Ecuadorian highlands, planted in 1995, in comparison with an open field system, in order to generate useful references for the change of land use from conventional systems to sustainable systems and friendly with the environment. The AFS studied were: 1) *Acacia melanoxylum* L. and *Buddleja incana* Ruiz y Pavón; and 2) *Alnus acuminata* O. Ktze and *Spartium junceum* L. Each System was composed of two rows of trees 30 m long, with 30 trees and 30 shrubs, separated in alternating spacings of 1m and 2m between rows, in the space between the rows of trees and shrubs three pasture options were evaluated. In the same manner, plots of Andean crops were planted one meter from the tree line on both external sides of the barriers. The variables evaluated were: apparent density of soil, total Organic Carbon, biomass of tree and shrub species. To estimate the aerial biomass of tree species, two allometric models were used. Carbon stored, in the first 12 years, in System *A. melanoxylum* and *B. incana* was 13% more carbon (168.49 t ha<sup>-1</sup>) than an System with *A. acuminata* and *S. junceum* (148.93 t ha<sup>-1</sup>) and 38% more carbon than an open air agricultural field system (122.22 t ha<sup>-1</sup>), at twelve years. About 75% of the carbon stored in an agroforestry system is found in the surface layer of the soil (0,2 m), this characteristic reveals the importance and care that must be given to this resource when deciding on the type of management.

**KEYWORDS:** Carbon sequestration. Environmental service. Agroforestry system.

### 1 INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, con el desarrollo desmesurado de algunas economías la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera ha aumentado considerablemente, esto tiene como consecuencia un incremento en la temperatura ambiental de la tierra, que podría generar un cambio climático con alteraciones en los ciclos hídricos, sequías, inundaciones y más desastres naturales que comprometerían la existencia de vida en el planeta (1, 2, 3, 4).

El uso de combustibles fósiles y el cambio en el uso del suelo son considerados a nivel mundial como las dos principales fuentes netas de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, relacionadas con el cambio climático global (5, 2). Entre 1989 y 1990 las emisiones de CO<sub>2</sub> provenientes

del uso de combustibles fósiles se estimó en  $6,0 \pm 0,5 \text{ Gt}^2 \text{ C}$ , comparada con  $5,7 \pm 0,5 \text{ Gt C}$  emitidas en 1 987 (6). Por otro lado, el flujo neto de  $\text{CO}_2$  emitido por cambio en el uso del suelo (principalmente por deforestación), se ha estimado en  $1,6 \pm 1 \text{ Gt C}$  para la década de los 1980 (7, 8, 9, 10).

El Protocolo de Kyoto y las subsecuentes Conferencias de las Partes (COP) de la Convención de Cambio Climático han despertado interés sobre el potencial de los ecosistemas Forestales y Agroforestales para fijar carbono, ya que la única forma de limpiar el  $\text{CO}_2$  de la atmósfera es a través de la fotosíntesis. Considerar este servicio ambiental y evaluarlo en términos ecológicos puede estimular proyectos forestales dentro del marco del Mecanismo de Desarrollo Limpio o para iniciativas de mercados paralelos de biocarbono (11, 12, 13, 14).

Los sistemas agroforestales son, no sólo una alternativa de producción sostenible, sino un modelo de agricultura climáticamente inteligente ya que permite diversificar las fincas e incrementar las fuentes de ingresos con la venta de servicios ambientales por reducción del  $\text{CO}_2$  atmosférico (15, 16, 17, 18, 19). El establecimiento de mercados de servicios ambientales puede contribuir de distintas maneras al desarrollo sostenible en el medio rural y en algunos casos sus beneficios trascienden el nivel local y adquiere una dimensión regional y hasta global (20, 21). El desarrollo de estos mercados puede conducir: al surgimiento de nuevas actividades económicas, generación de empleo y de ingresos a generadores de servicios ambientales. También, permite la transferencia de conocimientos y de recursos de otros sectores nacionales e internacionales al medio rural (22).

En un experimento realizado por (23) en el corregimiento de Santa Elena, Medellín-Colombia, encontró que un sistema silvopastoril de *Acacia decurrens* con *Pennisetum clandestinum* almacenó  $403,33 \text{ t ha}^{-1}$  de carbono orgánico total (sobre y bajo el suelo), mientras que en potreros sin árboles encontró  $272,03 \text{ t C ha}^{-1}$ . Esta es una muestra de interés por conocer el potencial de almacenamiento de carbono en los sistemas agroforestales, ya que estos pueden ser reconocidos en sistemas de compensación o pago por servicios ambientales (PSA); por ejemplo, en Costa Rica, los Sistemas Agroforestales ya son reconocidos en programas de PSA a través del decreto No. 30962, en virtud de los servicios ambientales que brindan a la sociedad, entre los cuales se encuentran el secuestro de carbono.

Con base en la situación actual, la agroforestería puede considerarse como una estrategia REDD+, ya que puede contribuir a conservar y recuperar reservas de carbono, por lo menos mitigando la presión por deforestación de nuevas áreas para fines

<sup>2</sup>  $\text{Gt} = 10^9 \text{ t} = \text{gigatón} = \text{mil millones de toneladas}$ .

agrícolas, a través de la implementación de métodos comprobados de rehabilitación de áreas forestales degradadas en relación a los gradientes climáticos y potencialidades ecológicas de las especies (24).

La investigación se realizó en un experimento de dos sistemas agroforestales que se ha venido investigando durante doce años consecutivos en la Estación Experimental Santa Catalina, EESC, del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, INIAP, cuyo objetivo fue probar los sistemas agroforestales para optimizar el uso del suelo y generar referencias útiles para el cambio de uso de sistemas convencionales a sistemas sostenibles y amigables con el ambiente, como alternativa de manejo sostenible de pequeñas parcelas que representan el minifundio de la sierra ecuatoriana. En este estudio se cuantificó la biomasa y carbono almacenado en la fito-masa aérea (biomasa y mantillo) y el suelo a 0,20 m de profundidad.

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 DESCRIPCIÓN DEL SITIO

La evaluación de la biomasa y carbono se realizó en un experimento agroforestal de doce años de edad, ubicado en la EESC del INIAP, a 3 050 m de altitud, 0° 22' Latitud Sur y 78° 23' de Longitud Oeste, 12° C de temperatura promedio y 1 200 mm de precipitación anual. Los suelos corresponden al orden Andisoles, de textura franca y de topografía relativamente plana.

### 2.2 DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO

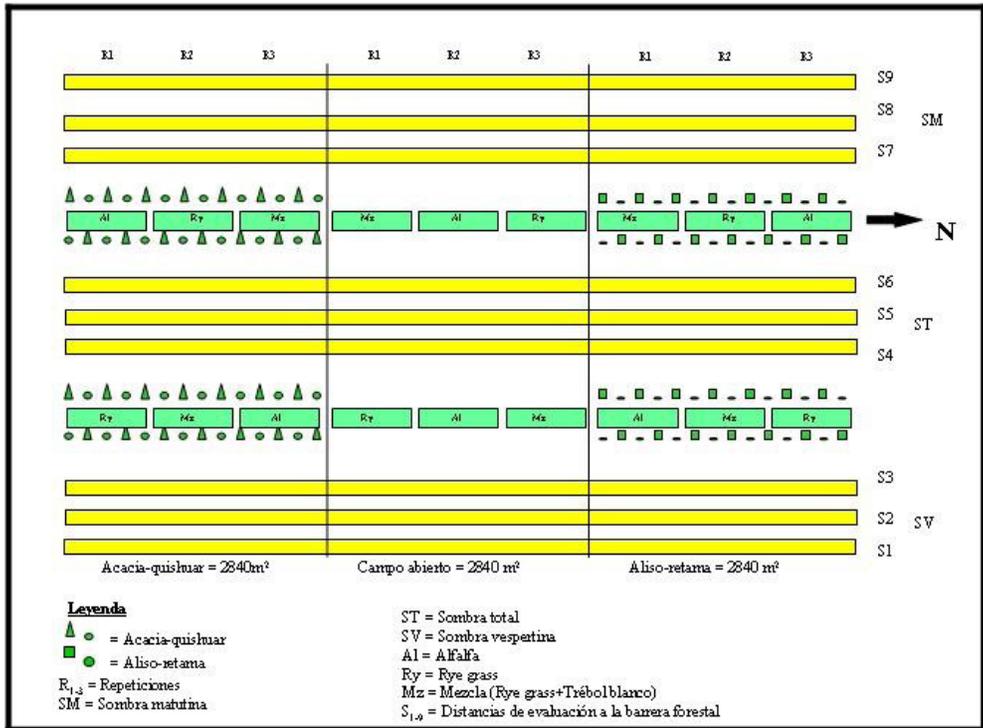
Los sistemas agroforestales (SAF) estudiados fueron: 1) La combinación Acacia-Quishuar, *Acacia melanoxylum* L. y *Buddleja incana* Ruiz y Pavón; y 2) La combinación Aliso-Retama, *Alnus acuminata* O. Ktze y *Sparteum junceum* L.; donde Acacia y Aliso, entraron como componentes arbóreos, mientras que Quishuar y Retama, como componentes arbustivos. Se utilizó una parcela control, a campo abierto, de las mismas dimensiones y con el mismo manejo de cultivos (durante el periodo de investigación) que en las parcelas agroforestales.

Cada SAF, estaba formado por dos hileras de árboles de 30 m de largo, con 30 árboles y 30 arbustos, separados en forma alternada a 1 m dentro de hileras y a 2 m entre hileras. Las barreras están orientadas de Norte a Sur, el área ocupada por cada sistema es de 2 840 m<sup>2</sup>, incluidos caminos.

En el espacio entre las hileras de árboles y arbustos se sembraron tres opciones de pastos: alfalfa (*Medicago sativa* L.); Rye Grass (*Lolium perenne* L.) y una mezcla de Rye

Grass con trébol blanco (*Trifolium repens* L.), en parcelas de 20 m<sup>2</sup> cada uno. Del mismo modo, a un metro de la línea de árboles, a los dos costados externos de las barreras se sembraron parcelas con cultivos propios de la zona (Figura 1).

Figura 1. Disposición de los componentes de los Sistemas agroforestales evaluados.



El manejo agronómico de los sistemas agroforestales evaluados y la tecnología aplicada fue similar al manejo de los agroecosistemas típicos de subsistencia de la sierra ecuatoriana, es decir, sin la aplicación reiterada de pesticidas, en cada ciclo de cultivo; de igual forma, las especies arbóreas y arbustivas se manejaron con podas anuales, para conseguir la formación de fuste comercial de los árboles, y para obtener leña de árboles y arbustos y biomasa fresca (forraje) de los arbustos.

Para el análisis de datos se utilizó el programa estadístico Statistical Analysis Systems para Windows V8 (SAS V8) y se aplicaron diferentes metodologías, así: medidas de tendencia central y de dispersión, análisis de varianza. El nivel de significancia utilizado en las pruebas estadísticas realizadas fue del 95%. Para comparar las medias de las variables se realizaron pruebas de rangos múltiples de Duncan.

## 2.3 METODOLOGÍA DE TOMA DE DATOS

- **Inventario de árboles y arbustos**

En todos los árboles presentes en cada SAF en estudio se registraron las siguientes variables: Diámetro a la Altura del Pecho (DAP) a 1,3 m del suelo, en cm, altura del fuste (m) y altura total (m). En arbustos se cuantificó la biomasa total en forma destructiva (n=9).

- **Estimación de biomasa aérea y carbono en el componente leñoso**

Para estimar la biomasa aérea de las especies arbóreas se utilizó el modelo alométrico elaborado por Riofrío (25) para *A. melanoxyllum* y Muñoz (26) para *A. acuminata*. Se prefirió utilizar estos modelos alométricos ya que fueron generados en las mismas condiciones climatológicas y de ubicación que los sistemas agroforestales estudiados.

Modelo alométrico para *A. melanoxyllum*, (25):

$$Y = - 68,762 + 0,468DAP + 0,663DAP^2$$

Dónde: Y = Biomasa aérea total (kg/árbol), DAP= Diámetro a la altura del pecho (cm), elevado al cuadrado.

Modelo alométrico para *A. acuminata*, (26):

$$Y = - 92,92 + 11,79DAP - 0,049Ht^2$$

Dónde: Y = Biomasa aérea total (kg/árbol), DAP= Diámetro a la altura del pecho (cm), Ht= Altura total elevado al cuadrado.

El carbono almacenado en las especies leñosas se estimó multiplicando la biomasa aérea total por el factor 0,5 recomendado por el IPCC.

- **Carbono orgánico en el suelo (CO)**

En nueve puntos de muestreo ubicados en un transecto Este-Oeste, se tomaron muestras de suelo a una profundidad de 0 a 0,2 m y se envió al Laboratorio de Suelos de la EESC del INIAP, para determinar el porcentaje de carbono orgánico, con estos resultados se estimó la cantidad de carbono presente en el suelo. Para tal efecto se utilizó la siguiente fórmula.

$$CS = CC * Da * P * 100$$

Dónde: CS = Carbono en el suelo (t C ha<sup>-1</sup>)

P = Profundidad de muestreo en (m), CC = Contenido de Carbono (%), Da = Densidad aparente en (t m<sup>-3</sup>), Se multiplica por 100 para convertir a toneladas ha<sup>-1</sup>.

- **Densidad aparente (Da)**

Para esta variable se utilizó el método del “cilindro de volumen conocido” (27), donde se tomaron muestras de 0-0,2 m de profundidad, ubicando el cilindro muestreador en el tercio medio de la profundidad en estudio, las muestras se analizaron en el laboratorio de Suelos de la EESC del INIAP.

- **Carbono almacenado en el mantillo/hojarasca**

La hojarasca se cuantificó con la ayuda de un cuadrante de 0,25 x 0,25 m, realizando seis evaluaciones por SAF. Los contenidos de hojarasca de cada muestra fueron pesados en el campo y se enviaron al laboratorio de Suelos de la Estación Experimental Santa Catalina del INIAP para obtener la biomasa del material. El contenido de carbono de la hojarasca se calculó con base en biomasa total y el factor de conversión (0,5) recomendado por el IPCC.

- **Carbono almacenado en los sistemas de uso de la tierra en estudio**

La cantidad de carbono almacenado por los sistemas de uso de la tierra evaluados fue la sumatoria del carbono de: la biomasa aérea, la hojarasca o mantillo y la capa arable del suelo y se expresó en t ha<sup>-1</sup>.

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 INVENTARIO DE ÁRBOLES Y ARBUSTOS

En el componente leñoso de cada SAF evaluado se registraron las siguientes variables de crecimiento: DAP a 1,3 m del suelo, en árboles, diámetro del fuste a 0,1 m del suelo, en arbustos y altura total tanto en árboles como en arbustos. En la Tabla 1 se presentan los datos promedios de estas variables, evaluadas al décimo segundo año de la plantación, donde se observa un comportamiento diferenciado de las especies evaluadas por estas variables. En el caso de *A. melanoxyllum* presentó un DAP de  $22,22 \pm 3,96$  cm y una altura total de  $15,51 \pm 1,57$  m en comparación a *A. acuminata* que presentó un DAP de  $13,97 \pm 3,19$  cm y una altura total de  $9,25 \pm 1,25$  m. En el caso del componente arbustivo, la retama (*S. junseum*) presentó un diámetro del fuste a 0,1 m del suelo de  $16,91 \pm 3,19$  cm, frente a  $12,04 \pm 1,97$  cm de quishuar (*B. incana*); las dos especies arbustivas presentaron una altura total de alrededor de 4 m. La variabilidad encontrada en las especies estudiadas por medio de las variables de crecimiento del componente leñoso de los SAF, se debe posiblemente al comportamiento característico de cada una de las especies, más no al efecto de la asociación en cada uno de los SAF.

Tabla 1. Resultados de la evaluación del crecimiento del componente leñoso (árboles y arbustos) de los Sistemas Agroforestales en la EESC.

Especie	Promedio	
	Diámetro (cm)	Altura total (m)
<i>A. melanoxylum</i>	22,22 ± 3,96 *	15,51 ± 1,57
<i>A. acuminata</i>	13,97 ± 3,19 *	9,25 ± 1,25
<i>B. incana</i>	12,04 ± 1,97 **	4,05 ± 0,62
<i>S. junseum</i>	16,91 ± 3,19 **	4,88 ± 1,25

\* = Diámetro del fuste a 1,3 m del suelo

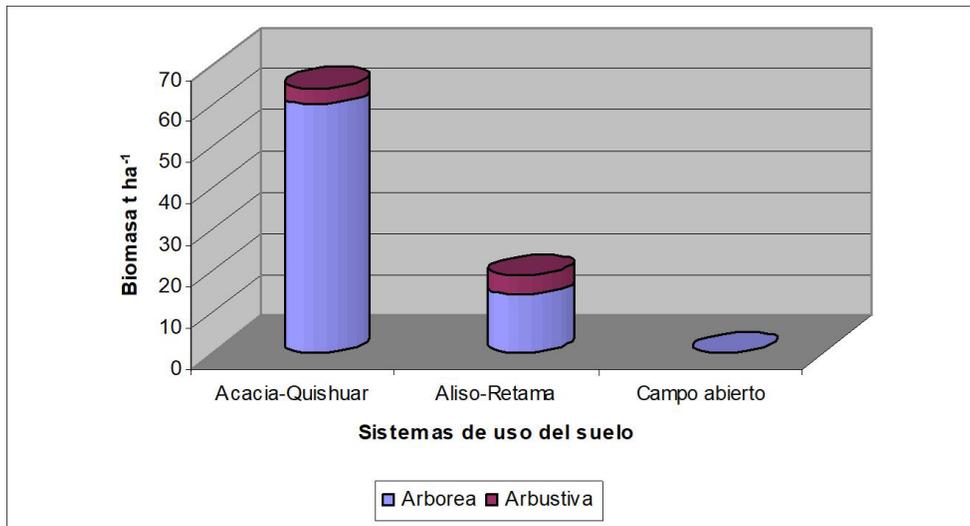
\*\* = Diámetro del fuste a 0,1 m del suelo

### 3.2 BIOMASA SECA AÉREA EL COMPONENTE LEÑOSO

Para evaluar esta variable se sumó la biomasa presente tanto en árboles como en arbustos de cada SAF. Los promedios de biomasa aérea de los sistemas de uso del suelo evaluados fueron diferentes entre ellos. El mayor rendimiento promedio de biomasa aérea, se registró en el sistema Acacia-Quishuar con  $63,00 \pm 7,40 \text{ t ha}^{-1}$ , seguido por el sistema Aliso-Retama con apenas  $18,75 \pm 1,79 \text{ t ha}^{-1}$  y finalmente, para el sistema control (campo abierto), por obvias razones no se registró biomasa leñosa (Figura 2). En esta gráfica se puede observar también que del total de biomasa leñosa presente en SAF Acacia-Quishuar, el 93,67 % corresponde al componente arbóreo y únicamente un 6,33 % al componente arbustivo; mientras que en el SAF Aliso-Retama el componente arbóreo aportó con el 74,75 % y el componente arbustivo con el 25,25 %. La gran diferencia en el aporte de biomasa entre las especies del componente leñoso de los SAF evaluados depende principalmente al hábito de crecimiento de las especies evaluadas, ya que *A. melanoxylum* presentó un IMA<sup>3</sup> para DAP y altura Total del 48 % superior a *A. acuminata*, en las condiciones medioambientales de EESC. Según Nair PKR (28), es de esperar estos comportamientos de las especies arbóreas en áreas intervenidas y degradadas, lo que podría ser relativamente eficiente comparada con otras estrategias de uso de la tierra, debido a que los SAF producen aportes significativos de hojarasca que mejoran paulatinamente la fertilidad de los suelos y favorecen la acumulación de carbono a corto plazo.

<sup>3</sup> IMA= Incremento Medio Anual.

Figura 2. Biomasa seca aérea total de árboles y arbustos de los Sistemas Agroforestales en la EESC.



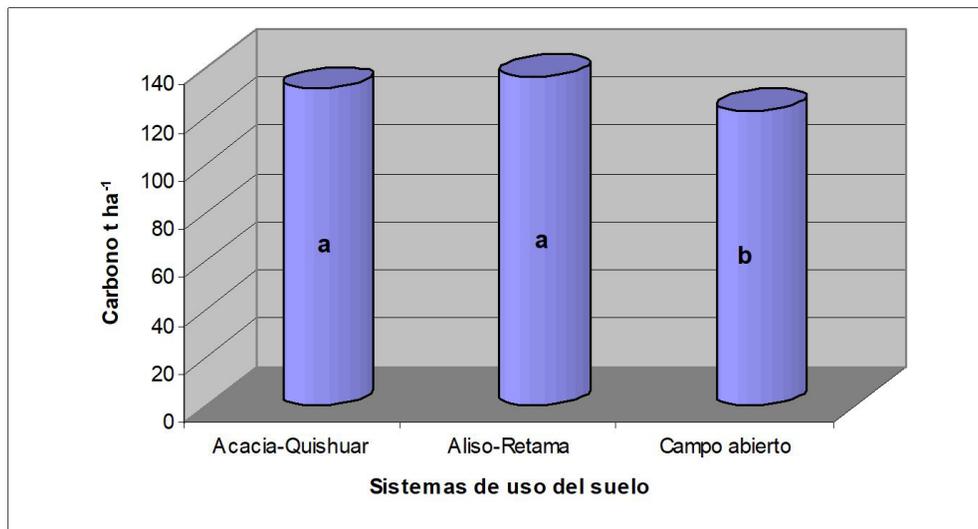
### 3.3 DENSIDAD APARENTE (DA) Y CARBONO ORGÁNICO EN EL SUELO (CO)

En estudios de contenidos de carbono en suelo es muy importante conocer la densidad aparente de éste ya que una de las formas de reportar el contenido de CO es por unidad de volumen. En el análisis de varianza realizado para el contenido de carbono en el suelo, no se encontró diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ) entre los sistemas de uso de la tierra en estudio, encontrándose un promedio de  $0,99 \text{ g/cm}^3$ , en los primeros  $0,2 \text{ m}$  de profundidad. Un alto contenido de materia orgánica en el suelo tiende a disminuir su densidad aparente, debido a que sus componentes son menos densos que los componentes minerales (29).

Varios investigadores (30, 31) indican que la dinámica del carbono en el suelo puede dividirse en tres fracciones: la fracción activa o carbono microbiano el cual representa entre 1 y 2% del carbono orgánico total (CO total), la fracción de carbono orgánico lento (CO lento) y el carbono orgánico pasivo (CO pasivo). En esta investigación se analizó únicamente el CO total en la capa superficial ( $0$  a  $0,2 \text{ m}$ ). La evaluación del efecto de los SAF en estudio sobre el CO total se realizó a través de un análisis de varianza para un diseño irrestricto al azar (DIA) con tres observaciones. De los resultados de este análisis se encontraron diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,0001$ ) para SAF. La comparación múltiple de Duncan con un  $\alpha$  del 5% para SAF en la variable contenido de CO total, determinó que los SAF Aliso-Retama con  $136,52 \text{ t ha}^{-1}$  y Acacia-Quishuar con  $131,48 \text{ t ha}^{-1}$  de CO, respectivamente, fueron significativamente mayores que el sistema Campo Abierto que presentó  $122,22 \text{ t ha}^{-1}$  de CO total (Figura 3).

Estos contenidos de carbono en suelo, a 0,2 m de profundidad, son el doble de los promedios reportados por otros investigadores (32, 22, 30) en estudios de suelo bajo diferentes sistemas de uso de la tierra en Centro América. El contenido del CO total en el suelo se relaciona con la biomasa de raíces finas (30). Es decir, tiene una tendencia a disminuir con el incremento en profundidad ya que una de las principales entradas de carbono al suelo está dado por la muerte constante de raíces finas (27, 28, 20).

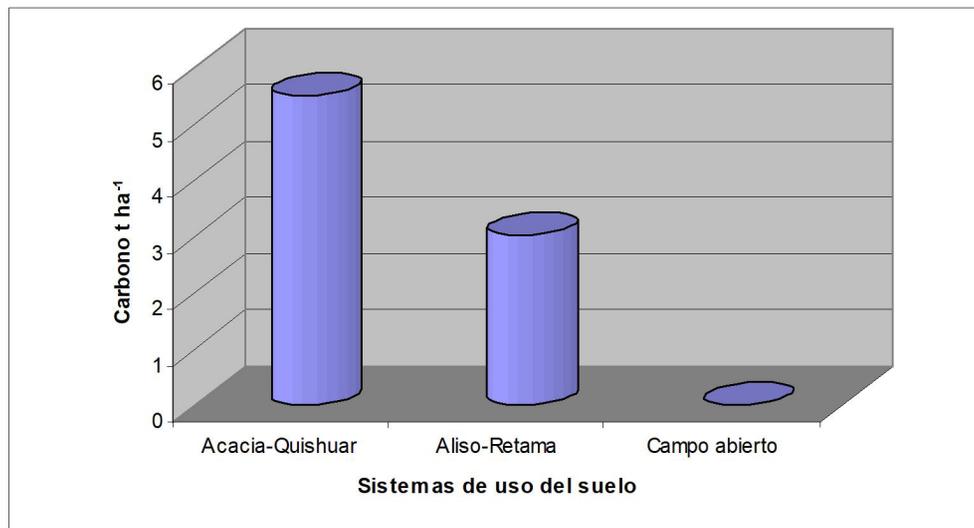
Figura 3. Promedios de Carbono total en suelo, a 0,2 m de profundidad, de Sistemas Agroforestales y Campo Abierto, evaluados en la EESC. (Letras iguales no difieren significativamente Duncan  $p < 0,05$ ).



### 3.4 CANTIDAD DE CARBONO EN EL MANTILLO/HOJARASCA

La presencia del componente leñoso en los sistemas agroforestales estudiados influyó considerablemente primero en el volumen de mantillo acumulado en la superficie del suelo y luego, en el de secuestro de carbono en el mantillo (hojarasca). El aporte de carbono en el mantillo u hojarasca (Figura 4) fue de 5,52 t ha<sup>-1</sup> para Acacia-Quishuar y de 3,03 t ha<sup>-1</sup> para Aliso-Retama, correspondiendo al 3,26 % y 2,03 % del carbono total de los SAF antes indicados, respectivamente. Datos parecidos reportan varios autores entre ellos, (8, 20) en SAF en ecozonas húmedas y sub-húmedas.

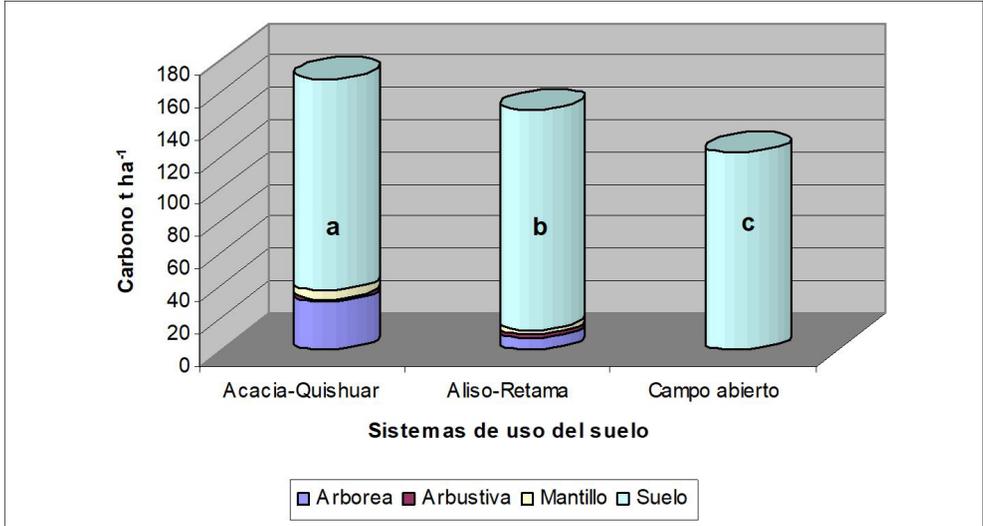
Figura 4. Carbono almacenado en mantillo/hojarasca de Sistemas de uso del suelo (Acacia-Quishuar, Aliso-Retama y Campo Abierto) evaluados en la EESC.



### 3.5 CARBONO ALMACENADO EN LOS SISTEMAS DE USO DEL SUELO EN ESTUDIO

Para evaluar esta variable se sumó el CO total almacenado en los componentes evaluados (en la parte aérea y bajo el suelo hasta 0,2 m de profundidad), en cada uno de los sistemas de uso del suelo. Con estos datos, se realizó un análisis de varianza para un Diseño Irrestricto al Azar (DIA). Este análisis detectó que los Sistemas de uso de la tierra Acacia-Quishuar (168,49 t ha<sup>-1</sup>), Aliso-Retama (148,93 t ha<sup>-1</sup>) y Campo Abierto (122,22 t ha<sup>-1</sup>) de CO, fueron estadísticamente diferentes entre ellos ( $p < 0,05$ ), (Figura 5) y al realizar la prueba de significación Duncan al 5%, esta encontró que los sistemas agroforestales Acacia-Quishuar y Aliso-Retama almacenan mayor cantidad de carbono que un sistema agrícola a campo abierto, por lo cual proporcionan un servicio ambiental. En ese sentido, (33) corroboran lo encontrado en la investigación y manifiestan que se estima que el establecimiento de sistemas agroforestales a escala global puede capturar cerca de 38 billones de megagramos de carbono, con una capacidad de almacenamiento de carbono que oscila entre 12 y 200 Mg ha<sup>-1</sup>, y aproximadamente 95 Mg ha<sup>-1</sup> en zonas tropicales.

Figura 5. Carbono almacenado en Sistemas de uso de la tierra (Acacia-Quishuar, Aliso-Retama y Campo Abierto), evaluados en la EESC (Letras iguales no difieren significativamente Duncan  $p < 0,05$ ).



En la Figura 5, se puede observar también que los SAF se presentan como sumideros eficaces de carbono (38 % en el caso de Acacia-Quishuar y 22 % en Aliso-Retama), superiores, en comparación al sistema Campo Abierto; de los cuales, el 22,26 % y 8,37 % son incrementos de carbono en los SAF Acacia-Quishuar y Aliso-Retama por efecto de las especies leñosas. Por otra parte, se puede observar que el suelo es un componente muy importante para almacena el carbono, debido a que sobre el 75 % del CO total de los SAF se encuentra en éste, lo cual indica la importancia que hay que darle a este recurso en cuanto a su manejo, ya que si no se utiliza tecnología adecuada éste se puede perder por erosión, situación observable en más del 80 % de los suelos de la Sierra ecuatoriana. Estos datos corroboran a lo reportado por varios autores entre ellos (32, 28, 22, 30), donde manifiestan haber encontrado en estudios bajo Sistemas Silvopastoriles sobre el 80% del CO total en el suelo y el 20% en componentes sobre el suelo.

#### 4 CONCLUSIONES

Los Sistemas Agroforestales probados en la EESC (Acacia-Quishuar y Aliso-Retama), en comparación con el sistema agrícola a Campo abierto, proporcionan un servicio ambiental de almacenamiento de carbono que es significativo, aunque variable dependiendo de las especies leñosas que conforman los sistemas.

Un Sistema Agroforestal con *Acacia melanoxylum* y *Budlejja incana* almacena 13 % más carbono que un Sistema Agroforestal con *Alnus acuminata* y *Spartium junceum*

y 38 % más que un sistema agrícola a campo abierto, evaluados a los doce años desde su plantación.

Alrededor del 75 % del carbono almacenado en un Sistema Agroforestal se encuentra en la capa superficial del suelo (0 a 0,2 m), ésta característica indica la importancia del cuidado que se debe tener con el recurso suelo agrícola, especialmente al momento de decidir en el tipo de uso y labranza, para evitar no solamente la erosión del mismo sino la oxidación de la materia orgánica contenida y con ello la pérdida de CO.

## 5 AGRADECIMIENTOS

Dejamos nuestro sincero agradecimiento al equipo técnico del Departamento de Manejo de Suelos y Aguas de INIAP Santa Catalina por su apoyo brindado en la ejecución del proyecto de investigación en Agroforestería, y a la SENESCYT (FUNDACYT) quienes aportaron económicamente en el desarrollo de la iniciativa.

## 6 CONFLICTO DE INTERESES

No existe ningún tipo de conflicto en razón de que la información generada en la investigación es para apoyo de quienes puedan necesitar en beneficio técnico científico.

## REFERENCIAS

1. Wigley, T. M. L., 1999. The science of climate change: global and US perspectives. Washington, Pew Center on Global Climate Change. 48 p.
2. Thompson ID, J Ferreira, T Gardner, M Guariguata, LP Koh, K Okabe, Y Pan, CB Schmitt, J Tylanakis. 2012. Forest biodiversity, carbon and other ecosystem services: relationships and impacts of deforestation and forest degradation. In Parrota J, C Wildburger, S Mansourian eds. Understanding Relationships between Biodiversity, Carbon, Forests and People: The Key to Achieving REDD+ Objectives. Viena, Austria. A global assessment report IUFRO. p. 21-52.
3. Thompson ID, M Guariguata, V Kapos, K Okabe, C Bahamondez, V Heymell, R Nasi, C Sabogal. 2013. An operational framework for defining and monitoring forest degradation. *Ecology and Society* 18(2): 20. <<http://www.ecologyandsociety.org/vol18/iss2/art20>>.
4. Ciais, P.; C Sabine, G Bala, L Bopp, V Brovkin, J Canadell, A Chhabra, R DeFries, J Galloway, M Heimann, C Jones, C Le Quéré, RB Myneni, S Piao, P Thornton. 2013. Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In Stocker, TF, D Qin, GK Plattner, M Tignor, SK Allen, J Boschung, A Nauels, Y Xia, V Bex, PM Midgley eds. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York. Cambridge University Press. p. 465-570
5. Mintzer, I. 1992. Confronting Climate Change. Risk Implications and Responses. Cambridge, University Press, Cambridge.

6. IIPCC, 1990. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. Cambridge University Press, Cambridge.
7. IPCC, 1992. Climate Change 1992. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. Cambridge University Press, Cambridge.
8. Pan Y, RA Birdsey, J Fang, R Houghton, P Kauppi, WA Kurz, OL Phillips, A Shvidenko, SL Lewis, JG Canadell, P Ciais, RB Jackson, SW Pacala, AD McGuire, S Piao. 2011. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science* 333: 988-993. DOI: 10.1126/science.1201609.
9. Porro R, RP Miller, MR Tito, JA Donovan, JL Vivan, R Trancoso, RF Van Kanten, JE Grijalva, BL Ramirez, AL Gonçalves 2012. Agroforestry in the Amazon Region: A Pathway for Balancing Conservation and Development. In Nair PKR, D Garrity eds. Agroforestry: The Future of Global Land Use. *Advances in Agroforestry* 9. p. 391-428. DOI 10.1007/978- 94-007-4676-3\_20.
10. Boucher, D.; S. Roquemore, E. Fitzhughl. 2013. Brazil's Success in Reducing Deforestation. *Tropical Conservation Science* 6 (3): 426-445.
11. Benítez, P.; De Koning, F.; López, M.; Paredes H. 2002. Estimación de carbono en biomasa de bosques secundarios y plantaciones forestales en el Noroccidente del Ecuador. Informe TWF-31s. Del Programa de Apoyo Ecológico (TÓB) de la Cooperación Técnica Alemana GTZ. Eschborn – Alemania. 2 p.
12. Laurance WF, MA Cochrane, S Bergen, PM Fearnside, P Delamonica, C Barber, S D'Angelo, T Fernandes. 2001. The future of the Brazilian Amazon. *Science* 291: 438-439.
13. Laurance WF, AKM Albernaz, FM Fearnside, HL Vasconcelos, LV Ferreira. 2004. Deforestation in Amazonian. *Science* 21: 1109-1111.
14. Gatti LV, M Gloor, JB Miller, CE Dougherty, Y Malhi, LG Domingues, LS Basso, A Martinewski, CSC Correia, VF Borges, S Freitas, R Braz, LO Anderson, H Rocha, J Grace, OL Phillips, J Lloyd. 2014. Drought sensitivity of Amazonian carbon balance revealed by atmospheric measurements. *Nature* 506: 76-86. DOI: 10.1038/nature12957.
15. Soares-Filho BS, DC Nepstad, LM Curran, GC Cerqueira, RA Garcia, CA Ramos, E Voll, A McDonald, P Lefebvre, P Schlesinger. 2006. Modelling conservation in the Amazon basin. *Nature* 440: 520-523. DOI: 10.1038/nature04389.
16. Nobre CA, LDS Borma. 2009 'Tipping points' for the Amazon forest. *Current Opinion Environment Sustainability* 1: 28-36. DOI: 10.1016/j.cosust.2009.07.003.
17. Nepstad DC, BS Soares-Filho, F Merry, A Lima, P Moutinho, J Carter, M Bowman, A Cattaneo, H Rodrigues, S Schwartzman, DG McGrath, C Stickler, R Lubowski, P Piris-Cabezas, S Rivero, A Alencar, O Almeida, O Stella. 2009. The end of deforestation in the Brazilian Amazon. *Science* 326: 1350-1351. DOI: 10.1126/science.1182108.
18. Soares-Filho B, P Moutinho, D Nepstad, A Anderson, H Rodrigues, R Garcia, L Dietzsch, F Merry, M Bowman, L Hissa, R Silvestrina, C Maretti. 2010. Role of Brazilian Amazon protected areas in climate change mitigation. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107: 10821-10826. DOI: 10.1073/pnas.0913048107.
19. Aragão LEOC, B Poulter, J Barlow. 2014. Environmental change and the carbon balance of Amazonian forests. *Biological Reviews* 89(4): 913-931. DOI: 10.1111/brv.12088.

20. Kapos V, WA Kurz, T Gardner. 2012. Impacts of forest and land management on biodiversity and carbon. In Parrota JA, C Wildburger, S Mansourian eds. *Understanding Relationships between Biodiversity, Carbon, Forests and People: The Key to Achieving REDD+ Objectives*. Viena, Austria. A global assessment report IUFRO. p 53-78.
21. Tremblay S, M Lucotte, JP Revéret, R Davidson, F Mertens, CJ Passos, CA Romaña. 2015. Agroforestry systems as a profitable alternative to slash and burn practices in smallscale agriculture. *Agroforestry Systems* 89: 193-204. DOI: 10.1007/S10457-014-9753-Y.
22. Ruiz, A. 2002. Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas silvopastoriles y competitividad económica en Matiguás, Nicaragua. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 106 p.
23. Giraldo L. A.; Zapata M.; Naranjo J. F.; Sneider M.; Cuartas C. A.; Botero A.; Arias L. 2003. Estimación de las existencias de carbono en el sistema silvopastoril *Acacia decurrens* con *Pennisetum clandestinum*. In *Medición de la captura de carbono en ecosistemas forestales tropicales de Colombia. Contribuciones para la mitigación del cambio climático*. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Departamento de Ciencias forestales/Centro Andino para la economía en el medio ambiente. Colombia 314 p.
24. Villa, PM.; Martins, S.; Delgado L.; Nolasco de Oliveira, Silvio, Mota N. 2015. La agroforestería como estrategia para la recuperación y conservación de reservas de carbono en bosques de la Amazonía. *Bosques* 36(3):347-356. DOI: 10.4067/S0717-92002015000300002
25. Riofrío, J.; Ramos, R. y Muñoz, J. 2006. Ajuste de modelos alométricos para biomasa de *Acacia melanoxylum* L. bajo Sistema Agroforestal en la Sierra ecuatoriana.
26. Muñoz, J.; Ramos, R.; Riofrío, J. y Nieto, C. 2007. Modelos alométricos para estimación de carbono en aliso (*Alnus acuminata* O. Ktze) bajo sistema agroforestal en la sierra ecuatoriana.
27. MacDiken, K. 1997. *A Guide to Monitoring Carbon Storage in Forestry and Agroforestry Projects*. Winrock International, 1611 N. Kent St., Suite 600, Arlington, VA 22209, USA. 87 p.
28. Nair PKR, VD Nair, BM Kumar, JM Showalter. 2010. Carbon sequestration in agroforestry systems. *Advances Agronomy* 108: 237-307. DOI: 10.1016/S0065-2113(10)08005-3.
29. Henríquez C.; Cabalceta G. 1999. Guía práctica para el estudio introductorio de los suelos con un enfoque agrícola. Universidad de Costa Rica/ACCS. 1 ed. San José, C. R. 112 p.
30. Ramos, R. 2003. Fraccionamiento del carbono orgánico del suelo en tres tipos de uso de la tierra en fincas ganaderas de San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 81 p.
31. Ramos, R. Miranda, A. Crisanto, T. 2017, Romero, F. 2017. Comparativo de almacenamiento de carbono en Bosque Análogo y dos tipos de uso de la tierra, en el cantón Cumandá-Chimborazo-Ecuador. In *memorias Primer Congreso de Bosques y Agroforestería para el Siglo XXI*. ESPOCH 2017. Riobamba-Ecuador (en edición).
32. López, M.; Koning, F.; Paredes, H.; Benítez, P. 2002. Estimación de carbono en biomasa de bosques secundarios y plantaciones forestales en el noroccidente de Ecuador (en línea). Proyecto CO2-GTZ / University of Gottingen, Gottingen-Alemania. Consultado el 10 de oct. del 2003. Disponible en <http://www.gtz.de/toeb>
33. Albrecht A, ST Kandji. 2003. Carbon sequestration in tropical Agroforestry Systems. *Agriculture Ecosystems and Environment* 99: 15-27.

# CAPÍTULO 5

## CREATIVIDAD, INGENIO Y EDUCACIÓN PARA TRANSFORMAR EN VALOR LOS RESIDUOS GENERADOS DE LA PODA DE ÁRBOLES; EL CASO DEL PROSOPIS GLANDULOSA (MEZQUITE)

Data de submissão: 07/02/2023

Data de aceite: 20/02/2023

### José Melero-Oláquez

Tecnológico Nacional de México  
ITMexicali

Av. Instituto Tecnológico s/n  
Col. Elías Calles, México

<https://orcid.org/0000-0003-2971-857X>

### Argelia Melero-Hernández

Tecnológico Nacional de México  
ITMexicali

Av. Instituto Tecnológico s/n  
Col. Elías Calles, México

### Jorge Murillo-Romo

Estudiante  
Instituto Tecnológico de Mexicali

Av. Instituto Tecnológico s/n  
Col. Elías Calles, México

### Arturo Murillo-Herrera

Profesor  
Esc. Primaria José  
Ma. Morelos y Pavón  
México

al árbol del *Prosopis glandulosa* (mezquite) el cual es un árbol común en la zona desértica de Mexicali. Para generar un valor económico de estos residuos, en una Institución de Educación Superior (IES) se formó un grupo de trabajo el cual incluyó a un padre de familia, para diseñar, construir y vender los productos generados tales como portaplumas de escritorio, lámparas de diferentes tamaños, portavelas y portavasos. Los productos más solicitados en la primera exposición masiva que se organizó, fueron las lámparas de escritorio y los portavelas. Estos productos se fabrican con poca inversión inicial y como son muy solicitados permite generar buenas ganancias - la inversión inicial para un portavelas es entre 40 y 60 pesos mexicanos y se venden en un promedio de 200 pesos -. Como parte de su misión y visión, cada IES debe promover a sus miembros una cultura de educación ambiental de uso, reuso y transformación de los residuos sólidos que están al alcance de todos y con un poco de creatividad e ingenio se pueden obtener beneficios económicos, además de fomentar el emprendedurismo en los estudiantes.

**PALABRAS CLAVE:** Cultura ambiental. Diseño de productos. Mezquite. Poda. Residuos sólidos.

### 1 INTRODUCCIÓN

Ante el grave desperdicio de los residuos sólidos que aún se da en muchas partes del planeta, los seres vivos tenemos el

**RESUMEN:** Este proyecto se realizó con el fin de promover los usos que se le pueden dar a los residuos que se generan de la poda

reto para sensibilizarnos y educarnos para comprender las ventajas que se tienen en generar una economía circular de nuestros recursos (economipedia, 2017). En México, se están llevando a cabo esfuerzos para obtener un beneficio que generan los residuos de la poda del mezquite (*Prosopis glandulosa*), algunos en forma de artesanías, tal es el caso del pequeño poblado La flor de Jimulco, dentro del municipio de Torreón, Coah., donde los pobladores están participando en un proyecto para elaborar figuras artesanales a partir de este árbol en vez de incrementar su explotación para la elaboración del carbón lo cual ocasiona la deforestación de esa región (Holguín, 2005). Asimismo en la edición 2016 de la expo forestal en Guadalajara, Jalisco, el Estado de San Luis Potosí, participó con artesanías y muebles de madera de mezquite, dentro de otros productos, esta expo forma parte del encuentro de negocios forestales que a nivel nacional promueve el programa Nacional Forestal que depende de la Comisión Nacional Forestal (Conafor) la cual se encarga de acompañar a los diferentes productores en los procesos de compra-venta brindando gestión y asesoría que requieran las partes involucradas con el fin de que las promesas de negocio lleguen a buen fin (plano informativo, 2016). Este árbol es de fácil crecimiento, necesita poca agua para desarrollarse, en ocasiones lo tratan como una plaga, pero cuando los cortan, normalmente vuelven a retoñar. Si se les da un uso adecuado, se pueden obtener beneficios con la explotación de él, tal como lo han estado haciendo algunos pobladores de los ejidos cercanos a la ciudad de Mexicali, Baja California, donde con el tronco de estos, fabrican artesanías, tales como juegos de dominó, portallaves, servilleteros, chiltepineros (objetos que muelen las bolitas de chile chiltepin que se usan mucho en algunas comidas como el menudo) entre otras artesanías (De León, 2016).

También, la Conafor realizó un estudio a través de hornos de ladrillos para aprovechar las ramas del mezquite para transformarlo en carbón que no impacte en el hábitat y además que sea sustentable, pues se obtiene un 25% de rendimiento del carbón con respecto a lo forma de producir carbón artesanalmente (en hoyos sobre la tierra). En Mexicali, se tienen aproximadamente 600 hectáreas de este árbol, que además de su explotación, significa una hábitat para protección y alimentación de un sinnúmero de especies nativas o migrantes tales como víboras de cascabel, liebres, conejos, ratones, huijotas, ardillas, correcaminos, coyotes, entre otras. Actualmente, en un ejido del valle de Mexicali, se formó un grupo de señoras que se dedican a elaborar el Mezquipan a partir de la vaina del mezquite, la cual es molida hasta convertirla en harina con la que elabora este suculento pan que se vende como un producto artesanal. La cosecha de la vaina se lleva a cabo entre los meses de Julio a Septiembre, el mayor aprovechamiento del fruto del mezquite, se da como alimento pecuario, además, como forraje, sustituye a los cultivos de temporal que en épocas de

sequía pueden resultar desastrosas para la sobrevivencia de los hatos ganaderos en zonas áridas y semiáridas. Folfaghari y Harden en 1982, publicaron un análisis bromatológico que realizaron en 1982 a este fruto, la tabla 1 explica las principales componentes.

Tabla 1: Componentes de la vaina del mezquite sobre base seca (%).

Muestra	Proteínas (x6.25)	Grasa Cruda	Ceniza	Fibra Cruda	Carbohid. Totales
Fruto Verde	13.26	2.23	3.88	35.33	80.63
Fruto Maduro	13.35	2.87	3.4	24.73	80.38
Semilla	39.34	4.91	3.61	6.86	52.14
Pericarpio	7.02	2.08	3.62	29.63	87.08

Además contiene 20.7% de sacarosa y es rico en potasio, calcio y cloruro. Otros autores mencionan que la goma extraída de su corteza o ramas tiene posibilidades industriales, además, por supuesto, de su uso como leña y carbón (tiene un peso específico de 0.76) (Durso et al, 1973; Signoret, 1970). La tabla 2 muestra cuales son las características principales de esta planta.

Tabla 2: Composición química del mezquite.

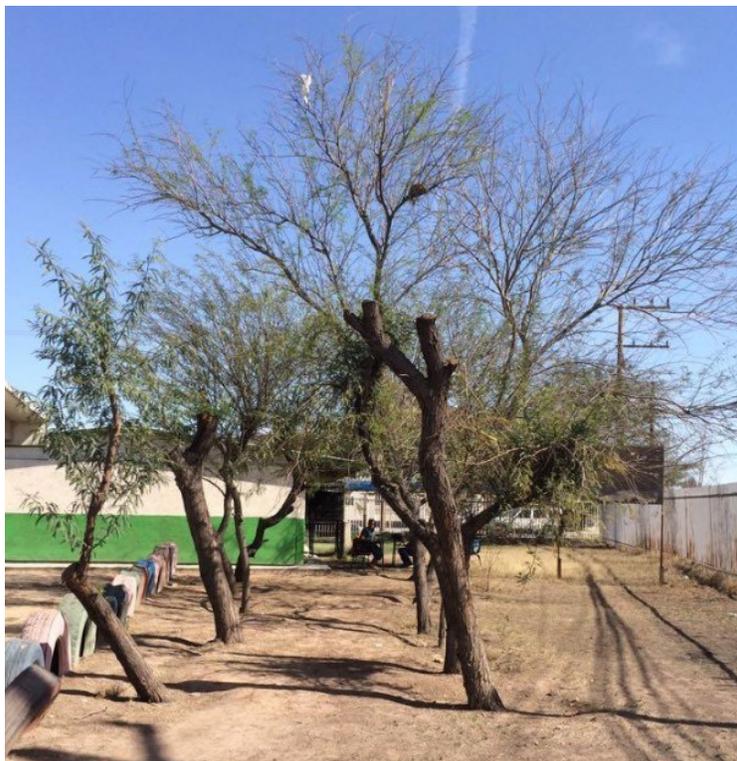
Parte	Proteína (g)	Grasa (g)	Carboid (g)	Fibra (g)	Cenizas (g)	Ca (mg)	P (mg)
Flor	21.0	3.2	65.8	15.5	10.0	1,310	400
Hojas	19.0	2.9	69.6	21.6	8.5	2,080	220
Frutos	13.9	3.0	78.3	27.7	4.8	-	-
Semillas	65.2	7.8	21.8	2.8	5.2	-	-

Fuente: FAO (1980)

## 2 METODOLOGÍA

Para aprovechar los recursos que puede generar un árbol muy común en la zona desértica del valle de Mexicali, el *Prosopis glandulosa* conocido en México como mezquite, se formó un grupo de trabajo interinstitucional; un maestro de educación primaria, un alumno de la carrera de Ingeniería en Energías Renovables y dos profesores de una IES, con el fin de determinar la viabilidad de generar recursos a partir de la poda de este árbol. Tales recursos deben ser usados en forma sustentable, esto es que se usen los residuos que generan la poda de estos árboles sin que se tengan que cortar de raíz, al contrario, al podarlos, se usan sus recursos y continúan dando beneficios, tales como una buena imagen y sombra en los meses cálidos. Para llevar a cabo este proyecto, solamente se usaron residuos de estos árboles de un solo lugar: La Escuela Primaria José Ma. Morelos y Pavón de la ciudad de Mexicali, la cual cuenta con 30 árboles de este tipo (figura 1), se podaron y con los residuos resultantes se elaboraron los productos mostrados.

Figura 1: Escuela donde se obtuvo la materia prima para este proyecto.



La forma de trabajo fue la siguiente:

## 2.1 REVISIÓN DE LITERATURA

A partir del estado de arte, se comprobó que existe un interés, tanto financiero como ambiental en este tipo de árboles que son muy característicos en regiones áridas y semiáridas en México y en otros lugares del mundo.

## 2.2 DISEÑO Y FABRICACIÓN DE PRODUCTOS ARTESANALES

Como resultado de la poda de estos árboles, se diseñaron algunos productos de diferentes dimensiones y formas, por lo que su fabricación depende en gran medida del ingenio y creatividad de quien va a elaborar dicho producto.

## 2.3 PROMOCIÓN DEL USO SUSTENTABLE DEL MEZQUITE Y OBTENCIÓN DE GANANCIAS

Se elaboró un tríptico y se participó en 2 exposiciones para dar a conocer las ventajas del uso sustentable del mezquite con una finalidad ambiental: concientizar a la

sociedad que al transformar los residuos en valor se genera una economía circular la cual propone un modelo productivo respetuoso y austero para el uso de los recursos disponibles (Gutiérrez-Rubí, 2015). Además, buscar obtener beneficios económicos por la venta de los productos elaborados.

## 2.4 MATERIAL Y EQUIPO USADO PARA LA ELABORACIÓN DE ARTESANÍAS

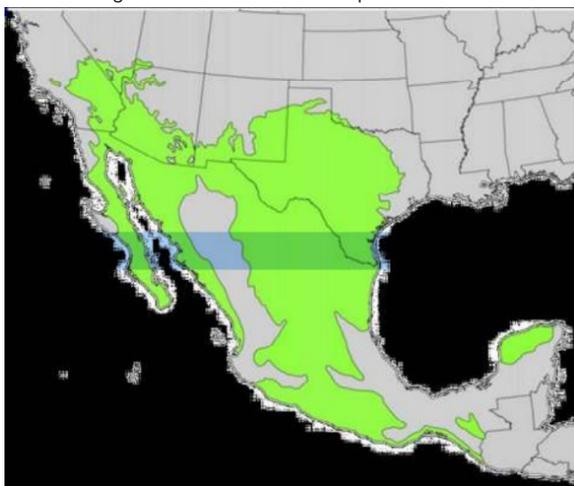
- ✓ Madera de mezquite
- ✓ Serrucho manual
- ✓ Segueta manual
- ✓ Tijeras para podar
- ✓ Taladro, brocas y sacabocados
- ✓ Barniz
- ✓ Brochas
- ✓ Creatividad e imaginación

## 3 RESULTADOS

### 3.1 DISTRIBUCIÓN EN MÉXICO

La revisión documental muestra que se tienen más ventajas que desventajas en el uso de la madera de mezquite, tanto para la elaboración de artesanías como para su industrialización (carbón de la madera y forraje con su fruto o vaina). En la figura 2 se muestra la distribución del mezquite en México y que tiene un buen potencial para explotar sustentablemente este producto (Arnero, 2015).

Figura 2: Distribución del mezquite en México.



### 3.2 FABRICACIÓN DE PRODUCTOS ARTESANALES Y SUS VENTAJAS COMO PRODUCTO SUSTENTABLE

Se diseñaron y fabricaron diversos productos de manera artesanal que fueron presentados en dos exposiciones los cuales tuvieron una buena aceptación. Las figuras 3 y 4 muestran los productos que se promocionaron en la primera exposición en una IES. Las figuras 5 y 6 muestran los diversos objetos que se mostraron en la segunda exposición de estos productos en una exposición religiosa.

Figura 3: Promoción de los productos artesanales.



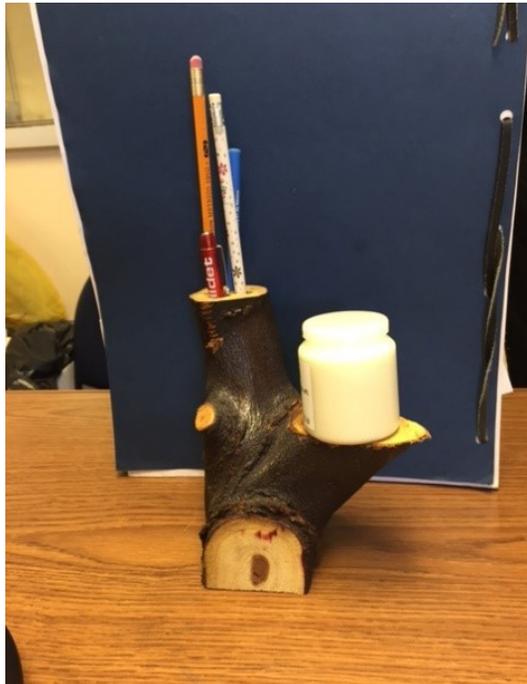
Figura 4: Primera Promoción.



Figura 5: Portavelas mostrado en la segunda exposición.



Figura 6: Portaplumas mostrado en las exposiciones.



La elaboración de estos productos, desde portalámparas hasta portaplumas, es realmente muy sencillo y divertido, solo se necesita un poco de ingenio para convertir un residuo en valor con una muy buena imagen que puede ser colocado en lugares

estratégicos de los hogares con el fin de contar con un objeto bueno, bonito y barato (en México se dice con las 3 b´s), la figura 7 muestra los detalles (sencillos y a la vez bonitos) con los que cuenta un portaplumas; el color de la corteza, el corte y el barnizado le dan un toque único.

Figura 7: Detalles únicos y sencillos de un portaplumas.



### 3 CONCLUSIONES

Este proyecto que se inició solamente como una parte de una clase de la materia Fuentes Renovables de Energía que se imparte en el Instituto Tecnológico de Mexicali y al revisar el estado del arte, se pudo visualizar el gran potencial de beneficios que en forma sustentable tiene este árbol.

Tiene un rápido crecimiento, no es gran consumidor de agua y se aprovecha prácticamente todo el árbol, desde las raíces que son muy duras y se usan para fabricar diferentes muebles, hasta sus hojas y frutos que sirven entre otras cosas como combustible, sombra para la fauna que vive en climas extremosos, alimento forrajero para animales, pero también para elaborar desde juguetes y utensilios, hasta como planta medicinal y también para ricos productos para consumo humano.

Es un árbol que aporta mucho a una gran parte del territorio Mexicano y de otras partes del mundo por lo que es importante crear conciencia de su manejo de una manera sustentable.

## REFERENCIAS

Economipedia. 2017. Haciendo fácil la economía. Significado de Economía circular. Obtenido desde <http://economipedia.com/definiciones/economia-circular.html>

Holguín, Ma. Elena. 2005. El siglo de Torreón. Promueven proyecto de artesanías con madera de mezquite. Obtenido desde <https://www.elsiglodetorreon.com.mx/noticia/134772.promueven-proyecto-de-artesantias-de-madera-de-mezquite.html>

Plano informativo. 2016. SLP expone artesanías de madera y palma en la Expo Forestal. Obtenido desde <http://planoinformativo.com/nota/id/486146/noticia/slp-expone-artesantias-de-madera-de-mezquite-y-palma-en-expo-forestal>.

Infomaderas.com. 2016. Madera y Medio ambiente. Reciclaje y residuos de madera. Obtenido desde <http://infomaderas.com/2013/04/19/reciclaje-y-residuos-de-madera/>

De León, Nicole. 2016. La Crónica. Bosques de mezquite, una economía verde. Obtenido desde <http://www.lacronica.com/Movil/EdicionEnLinea/Noticias/Notas/1053704.html>

INECC, 2016. Usos y propiedades de la madera de mezquite. SEMARNAT. Obtenido desde <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/72/ usos.html>

Gutiérrez-Rubí, Antonio. 2015.- Economía circular: repensando el modelo de empresa. Forbes México. Obtenido desde <https://www.forbes.com.mx/economia-circular-repensando-el-modelo-de-empresa/#gs.brieucs>

Arnero-Chávez, Miguel. 2015. La vaina de mezquite en la alimentación del ganado. Monografía para obtener el título de Médico Veterinario Zootecnista. AAA "Antonio Narro", Unidad Laguna, Torreón, Coah. México. Obtenida desde <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/6922/MIGUEL%20ANGEL%20ARNERO%20CHAVEZ.pdf?sequence=1>.

FAO. 1980. Mezquite (Prosopis juliflora). Obtenido desde <http://www.feedipedia.org/node/554>

# CAPÍTULO 6

## PROGRAMA DE CONSERVACIÓN Y FOMENTO DE LA CULTURA DE CUIDADO AMBIENTAL EN EL MUNICIPIO DE SAN JUAN ATZOMPA, PUEBLA, MÉXICO

Data de submissão: 02/02/2023

Data de aceite: 17/02/2023

### Sergio Alberto Vega Cisneros

Licenciatura en Administración  
Instituto Tecnológico Superior de  
Tepexi de Rodríguez  
Tepexi de Rodríguez, Puebla  
México

### Fabiola Mendoza Morales

Licenciatura en Administración  
Instituto Tecnológico Superior de  
Tepexi de Rodríguez  
Tepexi de Rodríguez, Puebla  
México

### Rosa María Canalizo Bravo

Licenciatura en Administración  
Instituto Tecnológico Superior de  
Tepexi de Rodríguez  
Tepexi de Rodríguez, Puebla  
México

### M.A. Claudia Domínguez Olmos<sup>1</sup>

Profesora  
Licenciatura en Administración  
Instituto Tecnológico Superior de  
Tepexi de Rodríguez  
Tepexi de Rodríguez, Puebla  
México

<https://orcid.org/0000-0003-2067-7230>

<sup>1</sup> autor corresponsal.

### M.A. Rosario Mejía Ramírez

Profesora  
Ingeniería en Gestión Empresarial  
Instituto Tecnológico Superior de  
Acatlán de Osorio  
México

### M.A. Adalit Arias Aragón

Profesora  
Ingeniería en Gestión Empresarial  
Instituto Tecnológico Superior de  
Acatlán de Osorio  
México

**RESUMEN:** El municipio de San Juan Atzompa se localiza en la parte central del estado de Puebla, tiene una superficie de 24.76 kilómetros cuadrados que lo ubica en el lugar 198, según datos de CONEVAL la población en 2010 fue de 872 personas; su territorio pertenece a dos regiones morfológicas: la Sierra del Tentzo y, al sur, el valle de Atlixco. En el año 2011 la Sierra del Tentzo fue declarada área natural protegida, con 57 mil 815 hectáreas, dicha reserva alberga un gran número de especies de flora y fauna de importancia económica para sus habitantes. Debido a la ubicación del municipio es de importancia que las autoridades establezcan programas que contribuyan a la conservación y fomento de cultura de cuidado ambiental dirigidos a los habitantes, de manera que sean partícipes y contribuyan al desarrollo sustentable de su municipio.

**PALABRAS CLAVE:** Programa. Conservación. Cultura ambiental. Municipio.

## 1 INTRODUCCIÓN

El municipio de San Juan Atzompa se localiza en la parte central del estado de Puebla, tiene una superficie de 24.76 kilómetros cuadrados que lo ubican en el lugar 198 con respecto a los demás municipios del estado, su territorio pertenece a dos regiones morfológicas: la Sierra del Tentzo y, al sur, el valle de Atlixco (INAFED, 2010), de acuerdo con datos del CONEVAL la población total del municipio en el 2010 fue de 872 personas.

El municipio se encuentra dentro de la serranía del Tentzo declarada área natural protegida en el año 2011, con 57 mil 815 hectáreas, en 13 municipios, representa el 1.6 % de la superficie del estado, donde se puede hallar una gran diversidad de plantas que son utilizadas por los pobladores, tales como: otate, palma, encino, chabaro, jarilla, uña de gato, sabino, salvia, espino, guaje entre muchas otras; así también es rico en fauna, encontrándose águilas, conejos, zorras, venados, víboras de cascabel, ardillas y coyotes; por lo que es importante cuidar esta reserva ecológica estatal de manera que no se agoten o deterioren los recursos naturales con los que cuenta, y al mismo tiempo hacer conciencia y fomentar la cultura de cuidado ambiental en los pobladores de la comunidad. Actualmente los habitantes de San Juan Atzompa se dedican a la elaboración de artesanías principalmente de otate y palma; otra actividad económica son los grupos musicales como: el mariachi y las bandas de viento.

Para apoyar en la conservación de los recursos naturales con los que cuenta en el municipio se propone la realización de un “Programa de conservación y fomento de la cultura ambiental”, teniendo a este como un instrumento operativo y flexible, el cual genere un proceso integrador que considere los aspectos sociales, biológicos, económicos, sociales y culturales que contribuya al desarrollo sustentable del municipio.

## 2 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO

El “Programa de conservación y fomento de la cultura ambiental” que se propone tiene por objetivo el concientizar a toda la comunidad sobre la importancia de la flora y fauna ubicada en la zona. Para la realización y ejecución del programa se pretende trabajar de manera colaborativa con autoridades municipales, instituciones educativas, clínica de salud, comuneros y la toda comunidad en general. Dicha propuesta se proyecta realizarla en dos etapas.

Como primera etapa se establece realizar un *diagnóstico* con el cual se pueda identificar principalmente aspectos sociales, biológicos, económicos y culturales; esto con el fin de retomar aquellos datos que deben ser valorados y difundidos a los pobladores y estos a su vez difundirlos a los visitantes que lleguen al municipio; ejemplo

de ello son las actividades económicas como la elaboración de artesanías, dentro de la cuales se encuentran: los chiquigüites de oate, los petates de palma, artesanías de sotul con la cual se elaboran figuritas que se venden en las ciudades el Domingo de Ramos; así también aspectos culturales, tales como: el festejo del día de muertos, la feria patronal que es celebrada el 24 de Junio, la fiesta anual celebrada del 11 al 24 de enero en la que se festeja a la virgen de Guadalupe, las danzas de los “Doce pares de Francia” y la danza de carnaval, entre otras actividades realizadas por los pobladores.

Figura 1. Fotografía de las bandas de música del municipio de San Juan Atzompa.



En la segunda etapa se plantea llevar a cabo el *fomento de la cultura de cuidado ambiental* mediante platicas que se den a las escuelas que se encuentran ubicadas dentro de la comunidad de los diferentes niveles educativos entre los que se encuentran las escuelas primaria “Justo Sierra Méndez”, secundaria “Hipócrates” y bachillerato general “Maximiliano Ávila Camacho”, con la finalidad de generar conciencia en los niños y jóvenes del impacto que generamos en la naturaleza y a su vez que valoren la riqueza natural que tienen a su alcance dentro de la reserva ecológica del Tentzo. Algunos de los temas que se proponen retomar para las pláticas son: Valoración de nuestra cultura y tradiciones, Fomento de cultura de cuidado ambiental e Importancia de la Reserva del Tentzo.

Durante esta misma etapa se propone realizar platicas en la clínica de salud dirigidas principalmente a los beneficiarios del programa Prospera, así como al personal a cargo de la clínica, sobre la Valoración de nuestra cultura y tradiciones, Fomento de cultura de cuidado ambiental, con la finalidad de que conozcan, valoren y hagan un mejor uso de los recursos naturales.

Figura 2. Fotografía de la zona perteneciente al municipio de San Juan Atzompa de la Sierra del Tentzo.



A los miembros del ayuntamiento de San Juan Atzompa se entregara el proyecto de manera física y electrónica; además de explicar detalladamente el impacto de la propuesta y la importancia de su participación en el programa de conservación y fomento de la cultura de cuidado ambiental para que ellos sean partícipes activos en la promoción y difusión del mismo, y de los beneficios que podría tener la población al aprovechar de manera adecuada los recursos con los cuales cuenta la reserva ecológica de la Sierra del Tentzo.

### 3 COMENTARIOS FINALES

#### 3.1 RESUMEN DE RESULTADOS

Con base a lo propuesto en el programa de “Conservación y fomento de la cultura de cuidado ambiental”, se pretende lograr concientizar a un promedio de 318 alumnos de las instituciones educativas ubicadas en la localidad, las cuales son: la escuela primaria “Justo Sierra Méndez”, la secundaria “Hipócrates” y el bachillerato general “Maximiliano Ávila Camacho”; de igual manera a todas aquellas personas que son beneficiarias del programa Prospera; e incluir a los 5 integrantes de la clínica de salud y a todo el personal que conforma al ayuntamiento del municipio de San Juan Atzompa.

Es importante resaltar que se considera a todos estos sectores de la población con la finalidad de concientizar a la mayor parte de los integrantes del municipio de San Juan Atzompa para que estén en sintonía y valoren su cultura, sus tradiciones y principalmente la riqueza natural con la que cuenta la reserva estatal de la sierra del Tentzo; además de evitar que sus tradiciones y costumbres se pierdan. Ya que como sabemos entre más cuidemos los recursos naturales que nos ofrece la naturaleza tendremos mayores beneficios y una mejor calidad de vida tanto para las generaciones presente y como futuras.

## 4 CONCLUSIONES

Se puede concluir que en la actualidad es relevante realizar actividades de conservación de los recursos naturales debido a los servicios ambientales que ofrecen a la humanidad para su subsistencia; además de generar conciencia en las generaciones presentes y futuras sobre la importancia de biodiversidad y de su aprovechamiento de manera sustentable. Así como también, es importante destacar estos temas a nivel nacional, estatal y municipal esto con la finalidad de generar conciencia y reflexión sobre el cuidado ambiental y del impacto que se está generando con nuestras acciones, en los niños, jóvenes, padres de familia y profesionistas, con el propósito de que conozcan lo que la naturaleza nos ofrece día a día, para hacer que las generaciones presentes y futuras puedan disfrutar de una manera correcta y eficiente las riquezas naturales.

Esto se lograra evitando la destrucción de la flora y fauna, no tirar basura y evitando la caza indiscriminada de animales, ya que al cuidar la biodiversidad que se localiza en la reserva ecológica estatal de la “Sierra del Tentzo”, podrían obtener un ingreso económico mediante el establecimiento de proyectos que puedan brindar servicios ecoturísticos o actividades económicas donde se aprovechen los recursos naturales de manera sustentable.

## 5 RECOMENDACIONES

Con respecto a la reflexión anterior se presentan a continuación las siguientes recomendaciones:

- En primera instancia se recomienda a las autoridades municipales de San Juan Atzompa en específico al presidente municipal y al regidor de ecología y medio ambiente, implementar estrategias que contribuyan en la conservación y fomento de la cultura ambiental, con la finalidad de que la población valore los recursos naturales que se encuentran en la reserva ecológica del Tentzo, y sele de seguimiento a las mismas, de tal forma que identifiquen el potencial productivo y ecológico de la reserva, y así se vea reflejado en un beneficio económico para la población.
- A las autoridades de la clínica de salud del San Juan Atzompa trabajen en conjunto con el promotor del programa PROSPERA para que implementen como un tema a tratar dentro de las pláticas brindadas a la población beneficiada; la conservación y fomento del cuidado de la reserva ecológica del Tentzo, y de esta manera sea difundido a los visitantes.

- A las instituciones educativas de la región, brinden autorización y al mismo tiempo estén dispuestos a colaborar con la implementación del programa “Conservación y fomento de la cultura de cuidado al medio ambiente” uniendo esfuerzos para concientizar a la comunidad estudiantil sobre la importancia de la biodiversidad con las que cuenta la reserva ecológica del Tentzo y de los servicios ambientales que ofrece a toda la población.
- A los comuneros, tengan la disposición para trabajar en colaboración con las autoridades municipales y educativas, para la implementación y desarrollo del programa, aprovechando su experiencia y conocimiento para brindar apoyo a la ejecución de las actividades.

## REFERENCIAS

Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL), 2010, Informe anual sobre la situación de pobreza y rezago social, San Juan Atzompa, Puebla. file:///C:/Users/claudia%20dominguez/Desktop/artuculos%20Journals%2017/tentzo/Puebla\_131.pdf

Instituto para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (INAFED), 2010, Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México, SEGOB.

Secretaría de Gobernación. <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM21puebla/municipios/21131a.html>

Mejora tu escuela.org, s/f, <http://www.mejoratuescuela.org/escuelas/index/21DPR1573D>

Gobierno Constitucional del Estado de Puebla, Periódico Oficial, Tomo CDXXII, H. Puebla de Z, viernes 29 de abril de 2011, Numero 12 segunda sección.

## NOTAS BIOGRÁFICAS

C. Sergio Alberto Vega Cisneros es alumno egresado de Licenciatura en Administración en el Instituto Tecnológico Superior de Tepexi de Rodríguez.

C. Fabiola Mendoza Morales es alumna egresada de Licenciatura en Administración en el Instituto Tecnológico Superior de Tepexi de Rodríguez.

C. Rosa María Canalizo Bravo es alumna egresada de licenciatura en Administración en el Instituto Tecnológico Superior de Tepexi de Rodríguez.

La **M.A. Claudia Domínguez Olmos** es profesora en el Instituto Tecnológico Superior de Tepexi de Rodríguez es egresada de la Licenciatura en Administración por el Instituto Tecnológico Superior de Tepexi de Rodríguez, tiene una Maestra en Administrativa por la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, es candidata a grado de doctora en Alta Dirección por la Universidad del Valle de Puebla.

La **M. A. Rosario Mejía Ramírez**, es profesora en el Instituto Tecnológico Superior de Acatlán de Osorio, cuenta con una Maestría en Administrativa por la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla.

La **M.A. Adalit Arias Aragón**, es profesora en el Instituto Tecnológico Superior de Acatlán de Osorio, cuenta con una Maestría en Administrativa por la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla.

# CAPÍTULO 7

## EMPREENDEDORISMO 360°

Data de submissão: 15/01/2023

Data de aceite: 03/02/2023

**Luis Alberto Ynfante**

Magister en Administración  
Estratégica de Negocios (UNaM)  
Universidad Nacional de Formosa  
Secretaría General de  
Ciencia y Tecnología  
Formosa, Argentina  
<https://orcid.org/0000-0002-0969-9159>

**RESUMEN:** Emprendedorismo 360°, es un nuevo concepto acuñado por primera vez en este proyecto de investigación, que focaliza no sólo en lo relevante que resulta pasar de la idea de negocio a la acción, sino también, como se hará para que ese pasaje y posterior desarrollo, sean sustentables y contemplen el uso más eficaz y eficiente de los recursos, en definitiva, de la energía a emplear, de ahí, que se torna relevante todo lo inherente a las energías renovables dentro del ecosistema emprendedor como uno de los nuevos ejes a contemplar en la Cultura Emprendedora Moderna. Básicamente, se apunta a dos objetivos: 1) Generar conciencia en el ecosistema emprendedor del uso eficiente y eficaz de los recursos energéticos, contemplando en su quehacer

emprendedor las energías renovables y 2) Plasmar en un manual de buenas prácticas el uso eficiente y eficaz de los recursos en el camino del emprendedor.

**PALABRAS CLAVE:** Emprendedorismo. Energías renovables. Economía. Educación. Desarrollo local.

### 360° ENTREPRENEURSHIP

**ABSTRACT:** 360° Entrepreneurship is a new concept coined for the first time in this research project, which focuses not only on how relevant it is to move from the business idea to action, but also how it will be done so that this passage and subsequent development, are sustainable and contemplate the most effective and efficient use of resources, in short, of the energy to be used, hence, everything inherent to renewable energies within the entrepreneurial ecosystem becomes relevant as one of the new axes to contemplate in Modern Entrepreneurial Culture. Basically, it aims at two objectives: 1) Generate awareness in the entrepreneurial ecosystem of the efficient and effective use of energy resources, contemplating renewable energies in its entrepreneurial work and 2) Embodiment in a manual of good practices the efficient and effective use of the resources in the path of the entrepreneur.

**KEYWORDS:** Entrepreneurship. Renewable energy. Economy. Education. Local development.

## 1 INTRODUCCIÓN

Este Proyecto de Investigación se enmarca en el concepto de Ecolinteligencia, es decir, comprender qué consecuencias tienen sobre el medio ambiente las decisiones que tomamos en nuestro día a día e intentar elegir las más beneficiosas para la salud del planeta. En tal sentido y con el objetivo de focalizar en el mundo de los negocios, y poder generar conocimiento y su posterior transferencia, nace: Emprendedorismo 360°, un nuevo concepto acuñado por primera vez en este Proyecto, que focaliza no sólo en lo relevante que resulta pasar de la idea de negocio a la acción, con la respectiva generación de un producto y/o servicio y puesta en marcha de una empresa, sino, y fundamentalmente, como se hará para que ese pasaje y posterior desarrollo, sean sustentables y contemplen el uso más eficaz y eficiente de los recursos, en definitiva, de la energía a emplear, de ahí, que tomará relevancia todo lo inherente a las energías renovables dentro del ecosistema emprendedor como uno de los nuevos ejes a contemplar en la Cultura Emprendedora Moderna.

Lo antedicho implica, analizar de punta a punta los pasos a seguir para gestar un emprendimiento, cualquiera sea su naturaleza, y ver en cada etapa, cuál sería la opción más eficaz y eficiente desde lo energético, como concepto amplio, referido a los recursos empleados.

Siendo, el producto final esperado, un documento donde se expongan las buenas prácticas en el sentido antedicho, a fin de penetrar con esta nueva visión en la cultura emprendedora actual, procurando generar un emprendedorismo más ecoamigable.

A los efectos de interpretar mejor las bases que sustentan este Proyecto, es menester esclarecer los siguientes conceptos relevantes para el mismo:

### 1.1 CULTURA EMPRENDEDORA

Más allá de la multiplicidad de definiciones académicas al respecto, a los fines de este trabajo, resulta significativo reconocer que la misma no es fija ni estática sino dinámica y flexible, adaptable a los cambios del entorno, lo que permite su enriquecimiento, y justamente, es esta premisa, la que impulsa y motiva la implementación de un Emprendedorismo 360°. No obstante, es menester, resumidamente y para contextualizar, referirnos a los antecedentes y necesidad del emprendedorismo.

#### 1.1.1 Antecedentes del emprendedorismo

Las teorías asociadas al emprendedorismo y la innovación datan de los últimos años del siglo XIX con Schumpeter, al determinar que la función del emprendedor es

determinante en los procesos de innovación y de inversión como mecanismos para la creación de iniciativas en el campo económico que generen valor, ya sea, mediante la producción de nuevos productos, nuevos procesos de producción, nuevas formas de organización y/o nuevos mercados. Así, para Schumpeter el emprendedor es aquel que favorece el desarrollo de nuevas aplicaciones aún desconocidas en el entorno económico, buscando la valorización de los resultados del progreso científico y técnico. Rodríguez (2005) retoma una cita de Schumpeter, iluminante para este caso: “La verdadera función de un emprendedor es la de tomar iniciativas, de crear”. Igualmente, Schumpeter resalta la importancia del trabajo en equipo como la manera de compartir las competencias necesarias cuando éstas no están concentradas en un sólo individuo. Este concepto es reforzado actualmente por el modelo presentado por Chabaud y Ngijol al resaltar que el emprendedor no es un innovador aislado; por el contrario, el proyecto empresarial debe apoyarse en redes que le permitan integrarse no sólo con otros individuos, sino con el entorno del emprendedor (empresa, universidad, gobierno), dimensionando la realidad del proyecto. Otros economistas, clásicos y neoclásicos, han estudiado la temática del emprendedorismo buscando identificar y clarificar los diferentes roles del emprendedor. En ese sentido, es importante resaltar el aporte de Alfred Marshall, al considerar la organización como cuarto factor de producción, validando que el emprendimiento puede ejercerse desde su propio puesto de trabajo.

### 1.1.2 Necesidad del emprendedorismo

El paso del modelo de producción en serie y masificado llamado fordista-taylorista al nuevo modelo de la desregulación de los mercados, la economía de la información y la tecnoglobalización, fue el inicio de un nuevo modelo de producción llamado posfordista con el cual las empresas modernizaron los procesos productivos. A partir de esto, el protagonismo y el liderazgo lo tienen las empresas innovadoras que acceden a las nuevas tecnologías de la información y la comunicación, se posicionan como líderes al incrementar las economías de escala crecientes, la diferenciación de productos y, por lo tanto, se hacen más competitivas internacionalmente, pudiendo así abarcar cada vez mercados más grandes y de mayor tecnología. Estas nuevas condiciones del mercado implican para las empresas, la exigencia de “contar con personas que posean un alto grado de flexibilidad para adecuarse a los nuevos procesos laborales y ajustar su desempeño a los requerimientos del cliente” (Pombo, 2006, p.29). Así, en la década de los ochenta se comienza a impulsar el mejoramiento de las condiciones productivas, donde la gran empresa industrial se organiza horizontalmente; desarrolla el liderazgo y

la creatividad, nuevas formas de asociatividad y altas capacidades de trabajo de equipo entre los miembros de la organización; los empleados reciben educación continua que les posibilita desarrollar con idoneidad las capacidades que requiere la flexibilidad productiva para poder asumir el cambio y formar nuevas competencias acordes con la demanda de bienes y servicios. Asimismo, se debe realizar una revalorización de la inversión inmaterial que es su conocimiento, reconocer sus competencias, habilidades y capacidades y de esta manera generar, de acuerdo a las necesidades de la sociedad y a sus propias expectativas y posibilidades, una sinergia productiva y social dentro del entorno donde se desenvuelven con la visión de competir productivamente en los mercados globales. En este contexto, es importante que los estudiantes tengan la ocasión institucional de desarrollar la empresariedad, entendida como la capacidad creativa para percibir e interrelacionarse con su entorno como empresarios innovadores. La nueva escala valorativa de los estudiantes deberá condicionar a la universidad para que ésta asuma la tarea de formar profesionales que puedan dar respuesta a la demanda que la empresariedad exige en el mundo globalizado. Según Castells (2006), la productividad de una empresa depende de un entorno económico en el que son imprescindibles infraestructuras de conectividad, sistemas de información avanzados, un sistema educativo de calidad y un sistema universitario y de investigación conectado con las empresas. Asimismo, señala que la fuente de innovación es la cultura del emprendimiento, la que está basada en el desarrollo de un sistema productivo en donde la financiación, mediante el mecanismo de capital riesgo o los microcréditos, deben ser central. Frente a esta realidad, surge la pregunta: ¿Cómo los estudiantes pueden aprender a promover los cambios requeridos para facilitar y estimular la generación de nuevos empresarios y de nuevas empresas? Es urgente identificar en la formación de los estudiantes, las áreas del conocimiento que deben ser reforzadas con el fin de habilitarlos como agentes del emprendedorismo, convirtiendo a la cultura emprendedora en una verdadera actitud personal y profesional.

## 1.2 ENERGÍAS RENOVABLES

Son aquellas fuentes energéticas basadas en la utilización del sol, el viento, el agua o la biomasa vegetal o animal -entre otras-. Se caracterizan por no utilizar combustibles fósiles -como sucede con las energías convencionales-, sino recursos capaces de renovarse ilimitadamente. Su impacto ambiental es de menor magnitud dado que además de no emplear recursos finitos, no generan contaminantes. Sus beneficios van desde la diversificación de la matriz energética de un país hasta el fomento a la industria nacional; y desde el desarrollo de las economías regionales hasta el impulso al turismo.

En tal sentido y a modo ejemplificador podemos mencionar a: la energía solar, la energía eólica, la energía geotérmica, la biomasa, el biogás y en general los biocombustibles.

Asociado a estas energías aparece el concepto de eficiencia energética, o comúnmente llamado ahorro energético. En definitiva, se refiere, al uso eficiente de la energía, con el objetivo de reducir la cantidad de energía requerida para proporcionar productos y servicios. Por ejemplo, aislar una casa permite que un edificio use menos energía de calefacción y refrigeración para lograr y mantener una temperatura agradable. La instalación de iluminación led, luces fluorescentes o tragaluces naturales reduce la cantidad de energía requerida para alcanzar el mismo nivel de iluminación en comparación con el uso de bombillas incandescentes tradicionales. Las mejoras en la eficiencia energética se logran generalmente mediante la adopción de una tecnología o un proceso de producción más eficientes o mediante la aplicación de métodos comúnmente aceptados para reducir las pérdidas de energía.

Hay muchas motivaciones para mejorar la eficiencia energética. La reducción del uso de energía reduce los costos de electricidad y puede generar un ahorro financiero para los consumidores si el ahorro de energía compensa cualquier costo adicional de implementar una tecnología de eficiencia energética. Reducir el uso de energía también se considera una solución al problema de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Según la Agencia Internacional de Energía, la eficiencia energética mejorada en edificios, procesos industriales y transporte podría reducir las necesidades de energía del mundo en 2050 en un tercio, y ayudar a controlar las emisiones globales de gases de efecto invernadero.

Se dice que la eficiencia energética y la energía renovable son los pilares gemelos de la política de energía sostenible y son prioridades altas en la jerarquía energética sostenible.

Los individuos y las organizaciones que son consumidores directos de la energía pueden reducir el consumo energético para disminuir costos y promover sustentabilidad económica, política y ambiental. Los usuarios industriales y comerciales pueden desear aumentar eficacia y maximizar así su beneficio. El consumo de la energía está directamente relacionado con la situación económica y los ciclos económicos, por lo que es necesaria una aproximación global que permita el diseño de políticas de eficiencia energética.

## 2 RELEVANCIA DEL PROYECTO

Como consecuencia del elevado desempleo y reducción del empleo público, esta visión y las formas de trabajo están cambiando, aparecen soluciones nuevas como el

desempeño simultáneo de varias actividades profesionales o la actividad profesional independiente.

Así pues, a pesar de que la inquietud emprendedora todavía representa un movimiento reducido en la enseñanza media, en la universidad y en la sociedad en general, el interés por el fenómeno del emprendimiento y de la creación de empresas va creciendo. Cada vez se valoran más las iniciativas empresariales, entre ellas el autoempleo, como un factor clave en la creación de empleo y el crecimiento económico de un país.

A esta realidad que ya es tendencia, hay que incorporarle la concientización por el cuidado del medio ambiente, situación, que sopesa el esfuerzo realizado por diversos organismos que lo promueven, aún, dicha bajada de línea no se percibe que haya llegado al emprendedor, pues, se aprecia que el uso eficiente de la energía, el uso de energías renovables y/o simplemente el uso eficiente y eficaz de los recursos al momento de emprender, no aparecen como variables relevantes en sus planes de negocios.

Por ello, para que crezcan el número de iniciativas que, sí contemplan lo antedicho, hay que fomentar la inquietud emprendedora ecoamigable en nuestra sociedad. Hay que procurar que se cree una cultura emprendedora que contemple el concepto de Emprendedorismo 360°, desde los más jóvenes, para que aprendan a desarrollar capacidades de responsabilidad y cambio y de esta manera puedan reaccionar con mayor apertura y flexibilidad, lo cual les va a ser de utilidad en la vida cotidiana y en el desempeño de cualquier actividad profesional.

Vale mencionar asimismo que, la creación de una empresa propia no repercute sólo en quien la emprende, creando su propio puesto de trabajo, sino que además influye en el crecimiento económico de la zona, generando un tejido empresarial, y por lo tanto en la creación de nuevos puestos de trabajo y bienestar social.

Por último, cabe destacar que, la educación emprendedora debe trabajar en el desarrollo del talento emprendedor, porque a pesar de que las personas presentan una predisposición innata, el emprendedor y/o intraemprendedor, en cierta medida, se hace, por ello, contar con un manual de buenas prácticas en el uso eficiente y eficaz de los recursos, resulta fundamental para llevar a la práctica esta nueva visión del emprendedorismo que se propone en este Proyecto.

### **3 DESARROLLO**

La metodología llevada adelante para concretar los objetivos propuestos, radica principalmente en la búsqueda y análisis de material bibliográfico, tanto en formato papel como digital (RSL -Revisión Sistemática de la Literatura-). Como así también, el intercambio

de experiencias aportada por los asociados al Proyecto, tanto de la Academia Argentina, como de la de Paraguay y Brasil, con los que la Universidad Nacional de Formosa posee convenios de colaboración institucional suscritos. Asimismo, el abordaje metodológico se complementará con la realización de encuestas y/o entrevistas, que posibiliten vislumbrar la relación que los emprendedores realizan entre su idea de negocio y el uso eficiente y eficaz de los recursos (principalmente, energéticos) para llevarlos adelante. En definitiva, se busca estudiar una situación particular a través de una combinación de métodos cuantitativos y cualitativos a fin de captar su dimensión objetiva y subjetiva y brindar la solidez necesaria al proceso de investigación, teniendo en cuenta las diferentes perspectivas y ángulos del objeto de estudio, el trabajo es de carácter exploratorio, observacional y descriptivo.

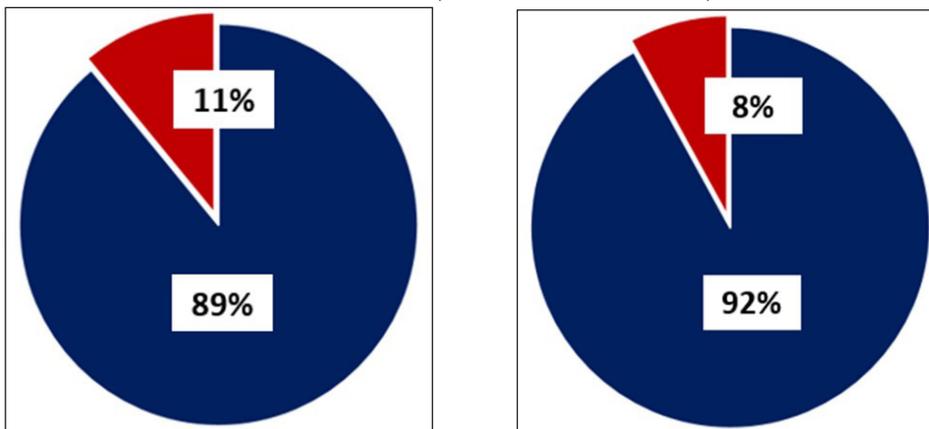
#### 4 RESULTADOS

Si bien, el proyecto se encuentra aún en desarrollo, en virtud de las dificultades y demoras generadas por la Pandemia COVID-19, entendemos que, siendo el resultado principal de este proyecto el de plasmar el concepto de Emprendedorismo 360°, como una nueva filosofía que se inyecte dentro de la Cultura Emprendedora Moderna, materializada a través de un manual de buenas prácticas en el uso eficiente y eficaz de los recursos en el camino del emprendedor, tanto en formato papel como digital, el impacto será relevante y amplio, ya que no sólo, llegará a la región, es decir, a los emprendedores de los países participantes (Argentina, Paraguay y Brasil) sino que, al gestar también, un espacio virtual de difusión, el cual actualmente se encuentra en construcción, el alcance será global. Por lo que, atento lo antedicho, se planteó prorrogar el desarrollo del Proyecto al menos hasta fines del año 2023, si bien, ya se han cumplimentado las siguientes etapas:

1. Elaboración del marco teórico y conceptual de la investigación.
2. Definición y caracterización de las variables y de los indicadores de las unidades de análisis.
3. Diseño de los instrumentos a utilizar para la recolección de la información.
4. Prueba piloto de los instrumentos. Reajustes y reelaboración de los mismos.
5. Relevamiento de la información, aplicación de instrumentos y técnicas diseñadas al efecto.
6. Análisis y procesamiento de la información. Triangulación metodológica con la finalidad de contribuir a la confiabilidad y validez de los datos.
7. Interpretación de los resultados. Elaboración de informes parciales.

Cabe mencionar al respecto, una encuesta llevada adelante sobre una muestra intencional de 250 emprendedores en la Ciudad de Formosa, que ha permitido visualizar la necesidad de una herramienta que les posibilite evaluar sus recursos y costos energéticos al momento de llevar sus ideas de negocios a la acción, pues, un 89% no analizaba esta cuestión (Gráfico 1), como así tampoco ya un, 92% no consideraba si su proyecto era eco amigable o como podría mejorarlo para que si lo fuera (Gráfico 2).

Gráfico 1 - Elaboración Propia. Gráfico 2 - Elaboración Propia.



#### 8. Divulgación de los resultados obtenidos.

Respecto de esta etapa, es destacable contar que, ya se han realizado presentaciones y obtenido reconocimientos, en distintos ámbitos científicos y académicos, como ser: en Argentina: por parte de la Red Argentina de Universidades por la Sustentabilidad y el Ambiente (RAUSA), en sus reuniones plenarias del 10/2019 y 09/2021 respectivamente; en las Jornadas de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de Formosa (UNaF), ediciones: XXII (11/2019), XXIV (11/2021) y XXV (11/2022). En Paraguay (09/2019): Ponencia en la Bienal Científica Internacional UNICAN 2019. Modalidad póster y oral. Obtención de la Mención de Honor en la modalidad oral. En Colombia, en 10/2021, en el marco del III Encuentro de Buenas Prácticas en Internacionalización de la Educación Superior, Línea 3 - Buenas Prácticas en Investigación; organizado por la Organización de Estados Iberoamericanos para la Educación, la Ciencia y la Cultura (OEI), el Instituto Internacional para la Educación Superior en América Latina y el Caribe (IESALC)-UNESCO, la Conferencia Regional de Educación Superior de América Latina y el Caribe (CRES), la Universidad Autónoma de Bucaramanga en Colombia -UNAB- y la Cátedra Iberoamericana de Educación OEI-UAH de la Universidad de Alcalá en España y la Asociación Colombiana de Universidades (ASCUN). Y en Brasil (05/2019), en el 1º Simposio Internacional Zicosur Universitario - Energías Renovables (SIZU 2019).

Quedando aún pendiente y en ejecución, la etapa 9: Elaboración y presentación del trabajo final: Manual de buenas prácticas en el uso eficiente y eficaz de los recursos en el camino del emprendedor.

Por último, vale mencionar que, este proyecto motivó al Rectorado de la UNaF, en 2021, a sumar su compromiso a la campaña internacional de la ONU: Race to Zero (Carrera hacia el cero), que le permitió tener presencia en la 26° Conferencia de las partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, celebrada en noviembre de 2021 en la ciudad de Glasgow, Escocia.

## 5 CONCLUSIÓN

Este proyecto de investigación, actualmente en marcha, tiene por finalidad desarrollar y difundir un nuevo concepto: Emprendedorismo 360°, que pretende impregnar y amalgamar la Cultura Emprendedora Moderna con el cuidado del medio ambiente, mediante el uso eficaz y eficiente de la energía, con énfasis en la utilización de las energías renovables. Por ello, con el desarrollo de esta investigación, en principio el emprendedor regional (Argentina-Paraguay-Brasil), se beneficiará desde el punto de vista cuantitativo y cualitativo, pues, obtendrá información relevante a fin de tomar decisiones que promuevan su idea de negocio en un marco eco sustentable.

## BIBLIOGRAFIA

Alemany, L., Alvarez, C. y Planellas, M., (2011). *Libro blanco de la iniciativa emprendedora en España*. Cataluña, España: Editorial Esade-Fundación Príncipe de Girona.

Gerber, M. (2015). *El mito del emprendedor*. Buenos Aires, Argentina: Editorial Paidós.

Krieger, M. (2021): *Desarrollo de organizaciones sostenibles en contextos turbulentos*. Buenos Aires, Argentina: Errepar.

March, C. y Vulcano, A. (2020): *La potencia del talento no mirado*. Buenos Aires, Argentina: Temas Grupo Editorial.

Núñez Cubero, L. (2015). *Cultura emprendedora y educación*. Sevilla, España: Editorial Universitaria.

Perales, B. T. (2012). *El universo de las energías renovables*. Barcelona, España: Editorial Marcombo.

Quilici, S. (2019): *Pensando en el 2030: las Pymes se ponen los objetivos al hombro*. Recuperado de: <https://www.cronista.com/pyme/negocios/Pensando-en-el-2030-las-Pymes-se-ponen-los-objetivos-al-hombro-20190731-0001.html>

Ynfante, L.A. (2019). *Universidad Emprendedora: Un nuevo desafío para la Academia*. Saarbrücken, Alemania: Editorial Académica Española.

# CAPÍTULO 8

## ELEMENTOS CLAVES PARA LA PROFESIONALIZACIÓN DEL RECURSO HUMANO EN ORGANISMOS OPERADORES DE MÉXICO<sup>1</sup>

Data de submissão: 06/12/2022

Data de aceite: 21/12/2022

### Carlos Alejandro Hernández Morales

Encargado de Profesionalización  
Coordinación Interinstitucional del Agua  
Servicios de Agua y Drenaje de  
Monterrey, I.P.D.  
Monterrey, Nuevo León, México  
ORCID: 0000-0002-4963-4085

### Daniel Salas Limón

Coordinador Interinstitucional del Agua  
Coordinación Interinstitucional del Agua  
Servicios de Agua y Drenaje de  
Monterrey, I.P.D.  
Monterrey, Nuevo León, México  
ORCID: 0000-0002-6090-7953

**RESUMEN:** La profesionalización en Organismos Operadores es un proceso de formación académica orientado a fortalecer los recursos humanos para una Gestión Integral del Recurso Hídrico por medio del desarrollo continuo de competencias técnicas, administrativas y transversales. El principal objetivo de este artículo, es describir los elementos clave para el planteamiento e inicio de un proceso de profesionalización dentro

<sup>1</sup> Artículo presentado anteriormente en el XXIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, celebrado en el año 2021.

del Organismo Operador, tomando como caso de estudio el programa implementado en Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey I.P.D. en el periodo 2019-2020. Como resultado del periodo bienal, se ha logrado ofrecer formación a un 24.68% del personal de planta del Organismo, y atendiendo ocho líneas de acción, encaminando a la mejora en calidad de los procedimientos y a mayor innovación y generación del conocimiento por parte del personal por medio del aprovechamiento de los nuevos aprendizajes. Se concluye presentando retos detectados a lo largo del programa, que en conjunción con una visión de Gestión del Conocimiento Organizacional aportarán a que la profesionalización sea un medio para la adquisición de conocimientos además de proporcionar los cimientos hacia la generación de Capital Intelectual en el sector Hídrico.

**PALABRAS CLAVES:** Profesionalización en el sector hídrico. Gestión educativa. Desarrollo de competencias.

KEY ELEMENTS FOR  
PROFESSIONALIZATION OF HUMAN  
RESOURCES IN WATER UTILITIES OF  
MEXICO

**ABSTRACT:** Professionalization in water utilities is an academic training process aimed at strengthening human resources for Integrated Water Resource Management through the continuous development of technical, administrative and cross-cutting

competencies. The main objective of this article is to describe the key elements for the approach and initiation of a professionalization process within the water utility, taking the case study of the program implemented in Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey I.P.D. in the period 2019-2020. As a result of the two-year period, we have been able to offer training to 24.68% of the Agency's permanent personnel, and have addressed eight lines of action, aimed at improving the quality of procedures and greater innovation and knowledge generation by personnel through the use of new knowledge. We conclude by presenting the challenges noted throughout the program, which in conjunction with a vision of Organizational Knowledge Management will contribute to professionalization as a means for the acquisition of knowledge, in addition to providing the foundations for the generation of Intellectual Capital in the water sector.

**KEYWORDS:** Professionalization in water industry. Educational management. Competence development.

## 1 INTRODUCCIÓN

Los organismos operadores son instituciones que se encargan de operar, conservar y administrar los sistemas de agua potable, alcantarillado y saneamiento (Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, S/F), dado que el agua es un recurso vital para la vida, es importante que los recursos materiales, económicos y humanos con los que cuentan logren un grado de excelencia en la manera de operar adecuadamente y en la forma de documentar los procesos que coadyuvan a proveer calidad en el agua ofrecida a la sociedad, y en los servicios internos que son necesarios para su correcta operación.

Sobre la importancia del agua y su gestión para el desarrollo y bienestar, podemos afirmar que:

El agua, como recurso vital para la vida y el desarrollo de cualquier país, debe ser administrada en beneficio de toda la población, lo cual implica asumir responsabilidades relacionadas con su contabilización, conservación y control de uso adecuado, así como reglamentar la asignación de derechos de uso del agua. La gestión del agua tiene que ver con la forma como se administra este recurso natural. (Martínez y Villalejo, 2018, p. 59).

Para poder satisfacer tal excelencia en un ambiente de mejora continua y responsabilidad social las necesidades de calidad y seguridad en el servicio que requieren los usuarios, reduciendo los riesgos y peligros en la operación diaria, es necesario contar con una profesionalización en acción que no solo cumpla con las competencias mentales que enriquecen el conocimiento a aplicar, si no con espacios de aplicación de las competencias adquiridas tanto las transversales, técnicas, como las de sustentabilidad e innovación.

Como antecedente, la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) reunió en el Centro de Información del Agua y Medio Ambiente

(CIAMA) a expertos de 20 países para abordar sistemas de información para tomar decisiones sobre agua Boné (2010, en Aragón Hoy) destacó que:

“El reto en la gestión del agua para este siglo es su profesionalización. Saber cuál es la mejor información de la que pueden disponer los gestores para tomar decisiones es un elemento importante y esa profesionalización de la gestión va a venir marcada por una alta tecnificación y un mayor desarrollo tecnológico” (Aragón hoy, 2010).

En este trabajo, se plantean los elementos clave que consideramos debe tener una metodología de profesionalización tomando como ejemplo el caso del programa que se desarrolla desde 2019 en Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey (SADM), conformada con el propósito de lograr mejorar las prácticas internas aumentando el conocimiento integral del recurso humano del organismo, dando un carácter académico a las competencias del personal y homogeneizándolo en el personal técnico, operativo, estratégico, gerencial y directivo de manera gradual.

## 2 CONTEXTO DE LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO (GIRH)

Los diversos intereses relacionados con el uso del agua, plantean retos importantes y muy variados que inciden en la toma de decisiones relativas al manejo de los recursos hídricos, particularmente cuando se pretende satisfacer, aplicando los principios de equidad y de conservación del recurso, las necesidades y deseos de los diferentes usuarios y de las partes interesadas. Esa visión de conjunto se denomina como gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH), y como su nombre lo indica, imprime coherencia a los intereses vinculados con el uso, control, aprovechamiento, preservación y sostenibilidad de los sistemas hídricos (GWP, 2000, en Martínez y Villalejo, 2018, p.60).

La GIRH constituye una visión integrada de no sólo qué aspectos del agua tenemos que cuidar para garantizar el aprovechamiento y sostenibilidad del recurso, sino además, comprender la multidisciplinariedad requerida para lograr dichas metas, la gestión del agua es más que poder captarla y dirigirla hasta el usuario final, también consiste en lograr aprovecharla de manera más eficiente para poder cubrir los cambios sociales, variabilidad climática y el crecimiento de las ciudades, cuidar aspectos ambientales y así conservar la naturaleza haciendo un uso compatible con las demandas ambientales, garantizar el derecho humano al agua, además de garantizar económicamente el funcionamiento de los Organismos Operadores para lograr una economía sostenible, que permita mantener los esfuerzos humanos para convivir con el agua mientras la utilizamos para nuestras necesidades.

La GIRH promueve en sí un cambio de enfoque en la gestión de los recursos hídricos. La misma promueve pasar de la fragmentación a la integración, de la mera explotación del

recurso (aprovechamiento) a la conservación y uso racional del recurso, de la gestión de la oferta a la gestión de la demanda, del paternalismo a la participación, de la centralización a la descentralización, del manejo de infraestructuras a la administración eficiente, de la ampliación de la cobertura de los subsidios para desarrollar el sector a la gestión del uso múltiple para la generación de ingresos y la reasignación del agua disponible.

Para poder realizar las adaptaciones pendientes hacia una Gestión Integrada de los Recursos Hídricos, la profesionalización y formación continua del personal de los Organismos Operadores son clave, es por ello que un objetivo estratégico de SADM es “Lograr la profesionalización del personal”.

### 3 PROFESIONALIZACIÓN

Consideramos profesionalización al proceso de formación académica continua de una o varias personas, que busca el dominio teórico-práctico de competencias específicas a nivel profesional en sus respectivas disciplinas, teniendo como resultado un aumento en la capacidad de toma de decisiones, aplicación de predicciones fundamentadas en aula y campo para la mejora continua y certificación de las habilidades ante organismos calificados, este proceso al ser implementado como un programa permanente ayudaría además a disminuir el riesgo de fallas en la Operación de sistemas de Agua Potable, Saneamiento, Alcantarillado y Comercial del Organismo, reducir las curvas de aprendizaje del personal de nuevo ingreso o que adquiere nuevas funciones en razón de un cambio de puesto o toma de responsabilidades, además de evitar los costos sociales y ambientales causados por errores humanos por falta de conocimiento y/o competencias necesarios.

La forma más adecuada de medir los efectos de la misma en una empresa o institución pública, es revisar el impacto, que, en contexto de profesionalización, se refiere a las ganancias (o reducción de pérdidas) que obtendrá la empresa, educando o institución tras cursar la capacitación profesional, estas pueden ser económicas, de desempeño, personales, de desarrollo profesional o relativas a la calidad de los procesos desarrollados (imagen profesional y ante la sociedad del Organismo Operador).

De este modo, la profesionalización es percibida como una inversión clave que genera mejoras en diferentes ámbitos internos y externos del Organismo Operador, al no sólo dar las habilidades necesarias a los miembros de este, sino buscar aumentar el valor que aportan a nivel de procesos, generación de nuevos conocimientos y tecnología y su reflejo en el logro de objetivos de la organización.

## 4 PAPEL DE LA ANDRAGOGÍA

El término Andragogía fue acuñado por el alemán Alexander Kapp, en 1833, con la intención de describir el modelo educativo de Platón, el término fue rechazado en su momento, sin embargo, en el año 1921, es que Eugen Rosenbach retoma el uso del mismo, sugiriendo que para educar a los adultos, era necesario una filosofía, unas técnicas y unos métodos diseñados exclusivamente para ellos. (González, 2018, p.10).

La Andragogía es definida por Alcalá (1999, en González, 2018) como “la ciencia que se ocupa de investigar y analizar sistemáticamente la educación de los adultos” (p.11), añadiendo que “el ser humano en el proceso de adultez, está plenamente convencido de la necesidad de continuar aprendiendo durante toda su existencia, el cual decide en forma deliberada qué estudiar, dónde, cuándo y cómo realizar sus actividades de aprendizaje” (p.12). En el caso de Organismos Operadores, el tomar la iniciativa de impulsar el crecimiento continuo del personal se vuelve necesario, en tanto que el funcionamiento operativo óptimo de instituciones de este estilo, cada vez requiere mayores conocimientos, una integración acelerada de avances tecnológicos que permitan aprovechar mejor el recurso, y una mayor conjunción interdisciplinaria del personal para lograr los objetivos estratégicos.

La Andragogía se orienta en función de tres elementos fundamentales, que es importante considerar en la planeación y gestión de un proceso de profesionalización, los cuales son: Participación, Horizontalidad y Flexibilidad.

La participación se refiere a la cualidad de los adultos, de complementar su conocimiento, proponer ideas y generar soluciones de forma conjunta, y con una postura de aprendizaje proactiva, según González (2018):

“El adulto no se puede ubicar como un simple receptor de información, sino que es capaz de interactuar con sus compañeros, puede tomar decisiones en conjunto con otros estudiantes participantes y actuar con estos en la ejecución de un trabajo o de una tarea asignada” (González, 2018, p.12).

La horizontalidad se refiere a que al ser adultos, tanto aprendices como mentores pueden aportar a la generación de conocimiento aprovechando características cualitativas (madurez, vivencias, necesidades e intereses de los participantes); y cuantitativas (cuestiones relacionadas con cambios físicos de los adultos, como decaimiento de la visión, audición y disminución de respuestas en general).

La flexibilidad es el elemento que:

“Parte de la premisa de que los adultos, al poseer una carga educativa-formativa llena de experiencias previas y cargas familiares o económicas, necesita lapsos de aprendizaje acordes con sus aptitudes y destrezas” (González, 2018, p.12).

En el caso de Organismos Operadores, este elemento se vuelve vital, ya que se cuenta con la responsabilidad de brindar el servicio de agua a los usuarios, a la vez hay que cuidar a los empleados del Organismo para poder mantener ese nivel de calidad contando con personal que se sienta valorado por la empresa; lograr un balance entre los tiempos laborales y personales es fundamental, y por ello la planeación de la formación en horarios laborales, la elección de temas que motiven al empleado, y comunicación cercana con las Instituciones que forman para contar con esa flexibilidad, son cuestiones clave que se deben de contemplar en esfuerzos de profesionalización.

## 5 ELEMENTOS CLAVES PARA LA PROFESIONALIZACIÓN

**Interinstitucionalidad:** La base del proceso de profesionalización consiste en el encuentro entre las instituciones académicas, que son aquellas que desarrollan los programas de estudio con pleno conocimiento del estado del arte de toda disciplina profesional, es entonces que un Organismo Operador con mira a la profesionalización, debe lograr un acercamiento proactivo con instituciones educativas de nivel técnico-superior, cuerpos académicos relacionados con la gestión integral del Agua, y estar al tanto de buenas prácticas señaladas por instancias internacionales del recurso vital.

En México cabe considerar además, a aquellas instituciones adheridas al Sistema Nacional de Competencias (SNC) coordinado por el Consejo Nacional de Normalización y Certificación de Competencias Laborales (CONOCER), el cual es un instrumento del Gobierno Federal que contribuye a la competitividad económica, al desarrollo educativo y al progreso social, con base en el fortalecimiento de las competencias de las personas.

El Sistema Nacional de Competencias facilita los mecanismos para que las organizaciones e instituciones públicas y privadas de México, cuenten con trabajadores, empresarios, docentes y servidores públicos más competentes. (CONOCER, 2019).

**Evaluación mixta de competencias:** La evaluación de competencias es planteada como una actividad objetiva, siguiendo los lineamientos de una Detección de Necesidades de Capacitación que cubran las necesidades del organismo, a la vez que responden a nuevos retos en las actividades de cada área Operativa y Administrativa, sin obviar la importancia de realizar un análisis de la experiencia subjetiva que pueden proporcionar los expertos de cada área a las nuevas necesidades que ellos pueden visualizar con su perspectiva.

**Interdisciplinariedad:** La integración de elementos de diversos campos de formación (refiriéndonos, por ejemplo, a Ingenieros Civiles, Eléctricos, elementos con una especialidad, personal sindicalizado con formación más técnica), sirve para promover la

interacción de grupos heterogéneos de profesionales del agua, para construir visiones integrales que ayuden a un mejor aprendizaje.

El aspecto interdisciplinario se beneficia de la característica Andragógica de participación, si partimos de que nuestros profesionales tienen conocimientos, podemos promover una cultura de participación para aprender en los cursos propuestos compartiendo experiencias en equipo, y utilizando las fortalezas de sus compañeros para lograr metas comunes.

**Transversalidad:** La profesionalización busca generar profesionales más eficientes y preparados para mejorar el ejercicio de sus actividades laborales, pero al ser personas, es imperativo buscar el desarrollo personal y las habilidades de gestión, es por eso que no sólo hay que desarrollar las habilidades técnicas, sino también las transversales, que se refieren a cuestiones como toma de decisiones, liderazgo, comunicación efectiva y gestión de emociones y estrés, el desarrollo de competencias de índole personal contribuye a un mejor desempeño laboral al tener más recursos para revisar problemas, comunicarse con las personas y trabajar a pesar de situaciones complicadas.

**Seguimiento:** La profesionalización se aborda con una visión de evolución constante, y su enfoque debe aspirar a ser un programa permanente que abona a las decisiones estratégicas realizadas a lo largo de las distintas administraciones; al profesionalizar al personal se logran mejorías en las áreas, lo que implica nuevas necesidades de la empresa, un seguimiento óptimo que busque la combinación de conocimientos dentro de la empresa, puede incluso dirigir hacia la generación de activos intelectuales por parte del Organismo para una mayor trascendencia de las experiencias, nuevas implementaciones en materia de investigación y programas de capacitación más eficientes y comprensivos para nuevas generaciones.

## 6 METODOLOGÍA

En el periodo administrativo actual en Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey I.P.D. fueron definidos Ejes Rectores enfocados en diferentes áreas de servicio con fin de demarcar las estrategias buscadas para asegurar la calidad y mejora continua de los servicios, un eje importante que sentó las bases del programa de profesionalización, es la acción “Lograr la profesionalización del personal”, perteneciente al Eje Rector de Capacidades e Innovación, a partir de esa definición, se emprendieron las siguientes acciones para el programa de profesionalización:

1) **Recolección de información:** La recolección de información para dar rumbo a la profesionalización, se realizó por medio de 2 técnicas, una es la identificación de

competencias de acuerdo a los profesiogramas existentes (los profesiogramas del Organismo incluyen información sobre el perfil de puesto, datos como formación y experiencia requeridos, funciones, responsabilidades del puesto, conocimientos requeridos y aptitudes socioemocionales ideales para ejecutar las funciones de mejor manera), la segunda consiste de la constatación de las mismas con personal clave de las áreas, además de revisar sugerencias de temas que puedan complementar la formación, esto permite una revisión objetiva de las necesidades explícitamente documentadas en la empresa y una revisión subjetiva de las necesidades detectadas por los profesionales en campo y/o supervisión. (Figura 1)

Figura 1.- Competencias detectadas tras las evaluaciones objetiva y subjetiva.

#### Competencias técnico-operativas

- Operación y mantenimiento de equipos de bombeo
- Gestión y Operación de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales
- Operación de Sistemas de Agua Potable y Alcantarillado
- Hidráulica Aplicada
- Análisis de estadísticas para la toma de decisiones
- Software para modelaciones hidráulicas
- Uso y manejo de cloro
- Mantenimiento electromecánico de instalaciones
- Macro y micro medición
- Conservación y calidad en reparación de pavimentos posteriores a trabajos

#### Competencias administrativas

- Supervisión
- Gestión de personal
- Gestión administrativa de proyectos
- Proceso legal
- Administración
- Normas Aplicables a Organismos Operadores
- Mejora en la atención al usuario

#### Competencias transversales

- Trabajo en Equipo
- Comunicación efectiva
- Inteligencia Emocional
- Solución de Problemas

2) Definición de niveles de profesionalización: Una vez definidas las competencias a priorizar en la primera fase, se definieron niveles de profesionalización (Figura 2) para diferenciar los grados de formación esperados en cursos y su implicación en el rol de la persona profesionalizada en la empresa, con la finalidad de poder caracterizar el resultado esperado una vez entrenadas las habilidades y usar esto para, a mediano plazo, elaborar planes de carrera para el personal de acuerdo con su puesto y responsabilidades, además de montar las bases para procesos de formación continua del personal desde el proceso de inducción, con la meta de formar líderes institucionales.

Figura 2.- Niveles de profesionalización en relación con necesidad de apoyo y aportación al Organismo Operador. Basado en: U.S. Office of Personnel Management (s/f). Leadership Competency Proficiency Levels. Elaboración propia.

Nivel de Conocimiento	Conocimiento Básico	Novato	Intermedio	Avanzado	Experto
Enfoque dentro de la organización	Aprender	Mejorar las habilidades	Usar las habilidades para mejorar procesos	Aportar en la solución de problemas	Dirigir estrategias para la mejora continua
Necesidades de apoyo	Supervisión necesaria	Necesita ayuda para realizar la aptitud de forma correcta	Requiere guía mínima	No requiere asistencia, puede guiar a otras personas	Guía, apoya en la solución de problemas en su área de conocimiento
Aporte a la empresa	Aporte en la ejecución de tareas básicas	Puede aportar en la ejecución de actividades	Comprende las implicaciones de sus actividades en el éxito de la empresa	Puede contribuir a elaborar materiales de referencia para la empresa	Puede diagramar y explicar de forma clara procesos y sus puntos clave
Potencial de impacto en empresa	Crecimiento en algún área en particular	Puede apoyar e la realización adecuada de una labor	Puede realizar actividades complejas con poca supervisión	Supervisión de áreas y proveer de ideas aplicables para solucionar problemas	Creación de nuevos métodos y líder en la elaboración de material de referencia
Nivel de experiencia	Inicial	Manejo adecuado de la competencia con supervisión	Puede tomar decisiones con poca necesidad de supervisión	Se le reconoce como una persona a la que puede pedirse guía en un tema especializado	Demuestra el dominio de la habilidad en diferentes contextos, se le considera líder

3) Contacto con instituciones: Se efectuaron convenios de colaboración con Universidades, Colegios Profesionales, Asociaciones y Centros de Investigación a nivel Local, Nacional e Internacional, con nivel académico desde técnico hasta posgrado, y se realizaron visitas a los departamentos de educación continua con el fin de comunicar el proyecto de profesionalización, solicitar información de cursos ya existentes y la posibilidad de generar cursos específicos, esta acción se implementó también en los programas “Escuela del Agua”, financiados por Recursos Federales autorizados al Organismo por medio de la Comisión Nacional del Agua, al solicitar cursos del Programa 2, que permite solventar necesidades de Capacitación específica de los Organismos Operadores.

4) Definición de cursos: Se proporcionó un formato de generación de curso a los departamentos consultados, esto para tener un catálogo de cursos, este formato incluye información del impacto que puede tener, para poder constatar la visión del curso y verificar si puede ser de utilidad para el desempeño del Organismo y las metas estratégicas a cubrir en el programa, aunado a lo anterior, se compartió la información con los líderes de área consultados en la recolección de información para así adecuar la formación a las necesidades actuales de cada grupo, es relevante indicar que todo curso considerado debía contar como requisito con una metodología teórico-práctica.

5) Seguimiento: Al finalizar cada curso, se solicitó un examen a las instituciones educativas para así confirmar y documentar que los aprendizajes han sido adquiridos, (confirmando la adquisición de la teoría), en cuanto a la parte práctica, se solicita a los instructores sesiones educativas en persona en el punto de trabajo, para poder revisar particularidades en campo y que así se pueda implementar en cada centro de trabajo.

Ya que fue necesario realizar una modificación de los cursos a una modalidad virtual debido a la pandemia por el virus SARS-CoV-2, un reto particular que continúa

siendo atendido es la necesidad de lograr un aprendizaje aplicado por medio de proyectos, la modalidad virtual presenta la dificultad principal de impedir la visita física a la instalación, una forma de poder fomentar el conocimiento, es por medio de la generación de proyectos que ayuden a que el personal pueda utilizar las competencias entrenadas para resolver problemas puntuales y/o proponer soluciones a las actividades de sus áreas, utilizando el conocimiento previo y los nuevos aprendizajes.

## 7 RESULTADOS

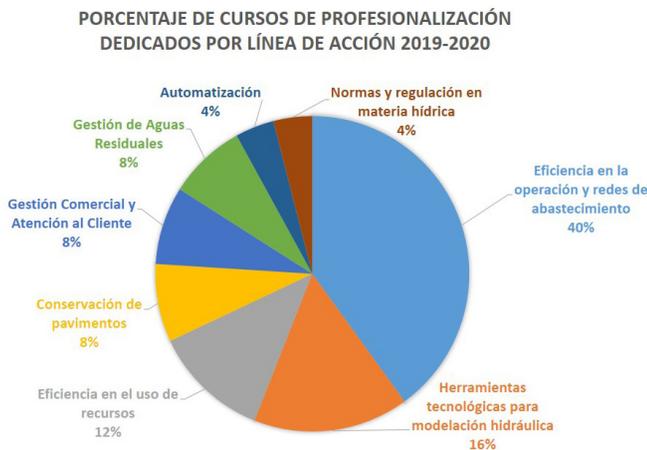
El programa de profesionalización se ha efectuado a partir del mes de abril de 2019, y sigue en curso actualmente, considerando los resultados de 2019 y 2020, se cuenta con los siguientes indicadores:

Figura 3.- Indicadores de profesionalización (2019-2020).

Inversión total para profesionalización 2019-2020	<ul style="list-style-type: none"> <li>• \$1,000,000 MXN (Recursos otorgados por Programas Federales de la Comisión Nacional del Agua).</li> <li>• \$1,178,424 MXN (Recursos propios)</li> </ul>
Número de cursos de profesionalización.	• 30
Total de personas capacitadas	• 452
Porcentaje de personal de confianza capacitado	• 24.68%
Inversión promedio (recursos propios) por persona participante en curso de profesionalización	• \$2,607.00 MXN

A partir de los avances logrados, se hizo un resumen de los avances en materia de competencias, se determinó que se ha actualizado al personal en 8 líneas de acción, las cuáles fueron atendidas de acuerdo a lo resumido en la Figura 4.

Figura 4.- Líneas de acción atendidas en los años 2019 y 2020 del programa de profesionalización de ADM.



En correspondencia con las líneas de acción ya atendidas, se proyecta continuar atendiendo las mismas en el programa de profesionalización, añadiendo además las siguientes competencias para fomentar en los plazos demarcados:

Figura 5.- Competencias detectadas para el plan de profesionalización SADM a corto y mediano plazo (2022-2026).



## 8 RETOS

La experiencia de profesionalización que hemos experimentado desde Febrero de 2019 nos ha proporcionado una visión de retos significativos que será necesario abordar y atender permanentemente al buscar el desarrollo del personal de Organismos Operadores a nivel Superior, los retos más sobresalientes detectados son:

- Lograr simultáneamente el fortalecimiento de competencias especializadas y la participación intrainstitucional del personal, buscando así la interdisciplinariedad dentro del Organismo, que enriquezca las actividades para lograr la Gestión Integral del Agua.
- Fomentar la participación del personal jubilado o por jubilarse para la transmisión de conocimientos por medio de cursos específicos tanto a empleados, como a personal de otros Organismos Operadores y compartir la experiencia (Esta acción involucra también la Gestión del Conocimiento Organizacional y un medio de difundir esos conocimientos para generar ingresos y difundir buenas prácticas).
- Formar al personal activo para poder organizar sus conocimientos a modo de cursos de formación puede constituir una fuente de ingresos y de mejora continua de las prácticas, aprovechando aún más el potencial del Capital Humano.

- Lograr la homogeneización de conocimientos en personal de todos los niveles jerárquicos, aumentando así la consistencia en la ejecución de actividades.
- Crear planes de carrera definidos a nivel institucional, que permitan desarrollar continuamente a los empleados, y que incentiven al personal más capacitado en puestos clave.
- Formar al personal en competencias transversales, que faciliten el trabajo colaborativo, la toma de decisiones informadas y la participación proactiva en aspectos de innovación y generación del conocimiento dentro de la institución.
- Generar una estructura educativa interna, que abra la posibilidad de que los empleados puedan crecer profesionalmente en aspectos relacionados con su plan de carrera, considerando incluso adaptaciones al mismo, este punto puede constituir una forma de salario emocional, que puede mejorar las condiciones de trabajo, lograr mayor motivación por parte de los empleados, y promover a Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, I.P.D. como una empresa líder en el bienestar de los empleados y crecimiento profesional.

## 9 CONCLUSIÓN

La profesionalización en Organismos Operadores es una acción de innovación en el campo hídrico, que se encuentra con el obstáculo de lograr integrar los diversos campos de conocimiento participantes en la gestión integral del recurso, los esfuerzos de profesionalización llevados a cabo en Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey aún están (a nuestra consideración) en la fase inicial, es vital contemplar el desarrollo profesional del personal como un proceso continuo que depende de la constancia, el compromiso de los actores en la toma de decisiones estratégicas de los Organismos Operadores, la continuidad permanente en cuanto a los esfuerzos de profesionalización, relaciones interinstitucionales sanas con las instituciones que apoyan en el rubro académico y finalmente, pero no menos importante, de dar lugar al personal para crecer conjuntamente con las Instituciones.

Lo anteriormente mencionado será el puente que contribuirá, en muchos casos, a una mejora en la calidad de los procedimientos, indicadores de eficiencia operativa positivos, bienestar de los empleados, adaptación veloz a imprevistos y avances tecnológicos, una cultura de mejora continua e inclusive la generación de Capital Intelectual que nutra el conocimiento que tenemos sobre el agua y cómo operar mejor para ofrecer un mejor servicio.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Aragón Hoy** (4 de mayo del 2010) La OCDE reúne en el CIAMA a 70 expertos y gestores de 20 países para abordar los sistemas de información para la toma de decisiones en la gestión del agua.. *Aragón\_Hoy*. Disponible en: <http://www.aragonhoy.net/index.php/mod.noticias/mem.detalle/id.3920>

**CONOCER.** (20 de Agosto del 2019). *Sistema Nacional de Competencias*, [conocer.com.mx](http://conocer.com.mx). Recuperado el 30 de junio del 2021 de: [https://conocer.gob.mx/acciones\\_programas/sistema-nacional-competencias/](https://conocer.gob.mx/acciones_programas/sistema-nacional-competencias/)

**Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental A.C.,** (s/f) *Organismos Operadores*: [Agua.com.mx](http://agua.com.mx), Disponible en: <https://agua.org.mx/organismos-operadores/>

**González, H.** (2018). *Aprendizaje a Distancia y los Cursos en Línea: Aspectos Andragógicos e Instruccionales*. CreateSpace Independent Publishing Platform. ISBN. 1984340123, 9781984340122.

**Martínez, Y; Villalejo, V.** (2018) La gestión integrada de los recursos hídricos: una necesidad de estos tiempos. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*. Vol. XXXIX (1), ene-abr 2018, p. 58-72. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/riha/v39n1/riha05118.pdf>

**U.S. Office of Personnel Management.** (s/f). *Proficiency Levels for Leadership Competencies* (Niveles de desempeño para competencias de liderazgo). Disponible en: <https://www.opm.gov/policy-data-oversight/assessment-and-selection/competencies/proficiency-levels-for-leadership-competencies.pdf>

# CAPÍTULO 9

## ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO ESCOLAR MODALIDAD VIRTUAL Y PRESENCIAL EN LA UNIDAD DE APRENDIZAJE DE FÍSICA BÁSICA DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CAMPECHE

Data de submissão: 31/01/2023

Data de aceite: 17/02/2023

### Mayté Cadena González

Universidad Autónoma de Campeche  
Escuela Preparatoria

Dr. Nazario V. Montejo Godoy  
San Francisco de Campeche  
Campeche, México

<http://orcid.org/0000-0003-4257-6596>

### María Alejandra Sarmiento Bojórquez

Universidad Autónoma de Campeche  
Escuela Preparatoria

Dr. Nazario V. Montejo Godoy  
San Francisco de Campeche  
Campeche, México

<http://orcid.org/0000-0001-5372-7535>

### Juan Fernando Casanova Rosado

Universidad Autónoma de Campeche  
Facultad de Odontología  
San Francisco de Campeche  
Campeche, México

<http://orcid.org/0000-0001-7622-5132>

**RESUMEN:** Ante la pandemia de COVID-19 la educación cambio repentinamente de una modalidad presencial a una virtual. Los docentes y alumnos se han tenido que adaptar en un corto tiempo y se teme que esto repercuta en su rendimiento escolar. El presente trabajo de investigación tiene por objetivo, conocer

si el cambio de modalidad presencial a virtual impacta en el rendimiento escolar de la unidad de aprendizaje de física básica, de la escuela preparatoria Nazario Víctor Montejo Godoy de la Universidad Autónoma de Campeche en México. Se utilizó una metodología de corte cuantitativo, con enfoque descriptivo y un alcance transversal con dos cortes: periodo escolar 2019-2020 y en el periodo escolar 2020-2021 ambos en la fase 1. Los resultados obtenidos demuestran que se incrementó considerablemente el rendimiento escolar reflejado los índices a aprobación, reprobación y promedio de aprovechamiento escolar. El incremento de aprobación fue de un 14.98%. En conclusión, el rendimiento escolar mejoro en el periodo escolar donde las clases fueron en línea, contrario a los que se esperaba los jóvenes se adaptaron rápidamente. Es importante adaptarse a la nueva normalidad, en México está comenzando la segunda ola de la pandemia y se debe continuar con la educación de los jóvenes.

**PALABRAS CLAVES:** COVID-19. E-learning. Rendimiento escolar.

### ANALYSIS OF SCHOOL PERFORMANCE IN VIRTUAL AND FACE-TO-FACE MODALITY IN THE BASIC PHYSICS LEARNING UNIT OF THE AUTONOMOUS UNIVERSITY OF CAMPECHE

**ABSTRACT:** In the face of the COVID-19 pandemic, education suddenly changed from a face-to-face modality to a virtual one.

Teachers and students have had to adapt in a short time, and it is feared that this will affect their school performance. The objective of this research work is to know if the change from face-to-face to virtual modality impacts on the school performance of the basic physics learning unit, of the Nazario Víctor Montejo Godoy preparatory school of the Autonomous University of Campeche in Mexico. A quantitative cutting methodology was used, with a descriptive approach and a cross-sectional scope with two cuts: the 2019-2020 school period and the 2020-2021 school period, both in phase 1. The results obtained show that reflected school performance increased considerably the passing, failing and average school achievement rates. The approval increase was 14.98%. In conclusion, school performance improved in the school period where classes were online, contrary to what was expected, young people quickly adapted. It is important to adapt to the new normal, in Mexico the second wave of the pandemic is beginning, and the education of young people must continue.

**KEYWORDS:** COVID-19. E-learning. School performance.

## 1 INTRODUCCIÓN

En el año 2020 se vivió un cambio repentino en la modalidad de dar las clases; ante la pandemia de COVID-19 se nos obligó a mantener el distanciamiento obligatorio y el confinamiento, realizándose de manera apresurada el cambio de modalidad presencial a clases en línea. El 11 de marzo fue decretada la pandemia por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y a partir de ese momento se tomaron los acuerdos para cerrar las escuelas e implementar nuevas estrategias. Ante la pandemia nos vimos en la necesidad de continuar enseñando desde la distancia utilizando los medios tecnológicos a nuestro alcance, pero como bien menciona Míguez (2020), este nuevo escenario trajo grandes cambios que modificaron las rutinas, los tiempos y los espacios escolares, para adaptar distintas herramientas tecnológicas como mediadoras de las tareas, esto aplica tanto para alumnos como para los mismos docentes. Adaptar el espacio, las estrategias, las tareas y todo lo que está inmerso en un proceso de enseñanza aprendizaje es un arduo trabajo que se desarrolló en corto tiempo.

En el último estudio de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) a través del Programa de Evaluación Internacional de los Alumnos (PISA), se muestra que los sistemas educativos a nivel mundial no están preparados para ofrecer una educación en línea a sus estudiantes. Nos muestra con cifras que el “9% de los estudiantes de 15 años, en los países de la OCDE, no tienen un lugar tranquilo para estudiar en casa y en países como Indonesia, Filipinas y Tailandia esta cifra supera el 30%” (Reimers y Schleicher, 2020, p. 24). Este mismo informe señala que “en México el 94% de los jóvenes de 15 años procedentes de entornos privilegiados, cuentan con acceso a internet en su hogar, en contraste con sólo el 29% de los jóvenes que viven en

entornos desfavorecidos". (p. 26), todo esto repercute en el rendimiento escolar de los jóvenes que no tienen un espacio adecuado para estudiar y tampoco cuentan con un servicio de Internet.

En México la educación media superior en el periodo 2019-2020 Fase 2, se concluyó en la modalidad en línea, logrando cubrir las competencias de las unidades de aprendizaje. En la actualidad tenemos grandes avances tecnológicos que nos ayudaron a no detenernos en la educación, pero al seguir la pandemia las medidas de contención siguen, por lo tanto, el semestre del periodo 2020-2021 fase 1 continuo en la modalidad en línea, pero ante la incertidumbre se modificó el calendario escolar y se inició el semestre el 21 de septiembre de 2020. A diferencia del semestre anterior, en esta ocasión se tuvo el tiempo para poder planear las estrategias adecuadas, aunque el tiempo se acorto.

En esta nueva fase de su educación los jóvenes ya adaptados a las aulas virtuales siguieron ampliando sus conocimientos, el ritmo de avance se normalizo. Pero surge nuevamente una interrogante sobre si esta nueva modalidad puede llegar a repercutir en el rendimiento de los jóvenes. Estudios a nivel mundial nos hablan de los riesgos que conlleva la suspensión prolongada de las clases en el contexto de confinamiento, Salvatierra, V. (2020), en un estudio realizado en Chile, menciona que poco más de 50 mil alumnos antes de la pandemia, presenta bajo ausentismo crónico con bajo rendimiento escolar, ante la nueva modalidad podría llevar a un aumento importante de los estudiantes con riesgo a deserción. Como señala López, Barreto, Mendoza y del Salto (2015) el desempeño académico es un proceso que se fortalece a medida que los estudiantes van dedicando más tiempo a los estudios. Es importante que asimilen la nueva normalidad que deben dedicar tiempo y planificar sus horas de estudio. Coronel, P. C. P., Herrera, D. G. G., Álvarez, J. C. E., y Zurita, I. N. (2020) menciona que los estudiantes antes de la pandemia manejaban la tecnología, pero no siempre para fines educativos, al tener las clases virtuales fue necesario conocer y utilizar en corto tiempo nuevas herramientas para sus clases en línea. Se puede pensar que esta adaptación pudiera repercutir en su rendimiento académico.

Ante la incertidumbre de saber si la modalidad en línea repercutía en el rendimiento de los estudiantes se realizó una investigación en la Escuela Preparatoria Dr. Nazario Víctor Montejo Godoy (NVMG) de la Universidad Autónoma de Campeche (UAC) en México, realmente ¿el cambio de modalidad presencial a virtual impacta en el rendimiento escolar de la unidad de aprendizaje de física básica?; se considera solo en esta asignatura ya que en años anteriores reportaba altos índices de reprobación en comparación con otras asignaturas y posteriormente queda abierta la opción de realizar el estudio en otras unidades de aprendizaje.

## 2 METODOLOGÍA

La investigación realizada es de tipo descriptivo, ya que utiliza la recolección de datos para probar con base en la medición numérica y el análisis estadístico (Hernández Sampieri, Fernández Collado y Batista Lucio, 2014), se mide el rendimiento escolar de un grupo de alumnos a través de los aspectos: reprobación, aprobación y aprovechamiento escolar; así como también se buscó especificar las propiedades sociológicas de los alumnos en estudio. El diseño de la investigación es el no experimental o ex post-facto con corte transversal, ya que solo se observará el fenómeno de rendimiento escolar tal y como se dio en dos periodos de tiempo únicos, para posteriormente hacer un análisis comparativo detallado.

Los periodos para estudiar son: el 2019-2020 fase 1 donde se dieron clases presenciales de la unidad de aprendizaje de Física Básica y 2020-2021 fase 1, donde se dio de manera virtual.

La investigación se realizó en la escuela preparatoria Dr. Nazario Víctor Montejo Godoy de la Universidad Autónoma de Campeche. El universo de trabajo está constituido por los alumnos que tomaron la unidad de aprendizaje de física básica en la escuela preparatoria NVMG en los periodos 2019-2020 y 2020-2021 fase I.

Los objetivos de la investigación son:

Objetivo General: conocer si el cambio de modalidad presencial a virtual impacta en el rendimiento escolar de la unidad de aprendizaje de física básica, de la escuela preparatoria Dr. Nazario Víctor Montejo Godoy de la Universidad Autónoma de Campeche en México.

Objetivos específicos:

- Conocer si los índices de reprobación de los alumnos de la unidad de aprendizaje de Física Básica de la escuela preparatoria NVMG de la UAC, aumentaron en el periodo 2020 - 2021 en comparación con el periodo 2019-2020 Fase 1.
- Conocer si los índices de aprobación de los alumnos de la unidad de aprendizaje de Física Básica, de la escuela preparatoria NVMG de la UAC, disminuyeron en el periodo 2020 - 2021, en comparación con el periodo 2019-2020 Fase 1.
- Comparar el promedio de aprovechamiento general de los alumnos de la unidad de aprendizaje de Física Básica, de la escuela preparatoria NVMG de la UAC, en los periodos 2019-2020, 2020-2021 Fase 1.

La variable es:

Rendimiento escolar, del cual solo se abordaron los siguientes aspectos: reprobación, aprobación y promedio de aprovechamiento general.

Selección de la muestra:

Para el presente estudio se trabajará con todos los alumnos inscritos en el tercer semestre de los periodos 2019-2020 y 2020-2021 fase I del turno matutino.

En este estudio estamos comparando el rendimiento escolar cuando las clases son de manera presencial donde los alumnos interactúan directamente con otras personas y cuando las clases son en línea y la interacción en por medios electrónicos. Esto nos lleva a pensar que al ser jóvenes y estar en el medio de las redes sociales, acostumbrados a utilizar estos medios para comunicarse pueden mejorar de manera positiva en su rendimiento escolar.

### 3 DESARROLLO

#### 3.1 RENDIMIENTO ESCOLAR

El rendimiento escolar se utiliza para saber de la actuación de los sujetos en el ámbito académico (Imig, 2020, p. 89). Si buscamos el significado de rendimiento encontramos en el diccionario de la Real Academia Española (2014), que es la proporción entre el producto o el resultado obtenido y los medios utilizados entre otras acepciones. Lamas, H. (2015) indica que el concepto de rendimiento escolar es algo complejo que inicia desde la conceptualización, ya que también suele nombrarse aptitud escolar o desempeño académico, pero la diferencia solo es por cuestiones de semántica y se usan como sinónimos.

El rendimiento según Imig, (2020, p. 89) “termina siendo un indicador del funcionamiento del sistema educativo en general”, se trata de alcanzar los objetivos propuestos para repasar métodos, programas, calificación, etc. Consideramos que se utiliza para medir el avance en términos académicos, que tiene el alumno, para verificar el nivel de conocimientos que demuestra en determinada área. Lamas, H. (2015) argumenta que el propósito del rendimiento escolar es alcanzar una meta educativa, es decir un aprendizaje que varía de acuerdo con las circunstancias, condiciones orgánicas y ambientales que determinan las aptitudes y experiencias.

Para Ariza, Toncel, y Blanchar, (2018) en una investigación realizada sobre el tema, concluyen:

“el rendimiento académico hace referencia a aspectos cualitativos y cuantitativos. Si se quisiera ubicar en una figura geométrica al rendimiento y al fracaso académico, sin duda lo más claro sería pensar en la representación

de un segmento y en cada uno de sus extremos la ubicación de una de las dos posibilidades. Sin embargo, aunque estén en extremos opuestos cuali y cuantitativamente, ambos conceptos estén interrelacionados y es útil estudiar y conocer, por lo menos, algunos de los factores que influyen en su determinación”.

Existen múltiples factores, que afectan el rendimiento de los estudiantes para Chon González, (2017), el primero de ellos son las condiciones socioeconómicas, ya que, a una mayor disponibilidad de ingresos a nivel familiar, implica pagar una escuela mejor. El segundo factor que menciona es el contexto familiar, se considera que la influencia paterna es importante en los aspectos ambientales y la motivación y por último considera el contexto escolar del cual depende la adaptación del ambiente académico. En una investigación realizada por Barrios Gaxiola, M. I., y Frías Armenta, M. (2016), se muestra como el recurso institucional familiar ayuda a los jóvenes, manifestando que entre mejor sea la relación con los padres, la comunicación y el apoyo brindado, mayor será el desarrollo positivo del joven.

En la actualidad hablar de los factores que influyen en el rendimiento escolar, tendríamos que mencionar los factores tecnológicos, es decir, si el alumno tiene o cuenta con un buen dispositivo para tomar las clases a distancia, o si la conexión que tiene para el servicio de Internet es bueno, que permita llevar las clases no solo de manera asincrónica sino, también sincrónica. También se tiene que reflexionar que la pandemia, nos tiene confinados, provocando posible estrés, en los implicados en el proceso enseñanza-aprendizaje. Con todos estos factores se puede pensar que existen un desbalance y los alumnos al pasar de una modalidad presencial a una a distancia, puede afectar el factor de su rendimiento escolar.

### 3.2 LA EDUCACIÓN EN LÍNEA Y SUS BENEFICIOS

La educación a distancia ha pasado por diferentes etapas a través de los años, su evolución a sido vertiginosa ya que al introducir las tecnologías estas han ido ampliando el concepto. La aparición masiva de los medios digitales y las tecnologías que se utilizan en la educación produjo un despliegue plural de términos de términos tales como: educación distribuida, aprendizaje electrónico (e-learning), educación virtual, educación en línea, aprendizaje combinado (Blended-Learning), aprendizaje móvil (m-learning) (Verdún, 2016). Todo este auge de tecnologías enriquece el sistema de educación a distancia, por lo que consideramos importante describir algunas de estas modalidades.

La “educación en línea en inglés e-learning, primeramente, se concebía como aquella que involucra cualquier medio electrónico de comunicación, incluyendo la videoconferencia y la audioconferencia. En sentido más específico, la educación

en línea significa enseñar y aprender a través de computadoras conectadas en red” (García, 2008, p. 50).

Los beneficios que aporta este tipo de educación se destacan, según Area Moreira, y Adell Segura:

- Extender y facilitar el acceso a la formación a colectivo e individuos que no puedan acceder a la modalidad presencial.
- Incrementar la autonomía y responsabilidad del estudiante en su propio proceso de aprendizaje.
- Superar las limitaciones provocadas por la separación en espacio y/o tiempo del profesor-alumnos.
- Gran potencial interactivo entre profesor-alumno.
- Flexibilidad en los tiempos y espacios educativos.
- Acceder a multiplicidad de fuentes y datos diferentes de los ofrecidos por el profesor en cualquier momento y desde cualquier lugar.
- Aprendizaje colaborativo entre comunidades virtuales de docentes y estudiantes (2009, p. 3).

Para Alonso Díaz, L. y Blázquez Entonado, F. (2016) la formación de manera virtual permite el poder trabajar no solo las competencias específicas que cada asignatura plantee, también se trabaja con otras competencias más generales como la planificación y gestión del tiempo, la comunicación oral y escrita en la propia lengua, así como habilidades informáticas básicas, el desarrollo de habilidades para la investigación, habilidades para el trabajo autónomo, entre otras.

También es válido mencionar que existen algunas desventajas como son las conexiones de red, los equipos utilizados para acceder a las clases, el ambiente donde se tomas las clases, etc.

Podemos cerrar diciendo que “la educación en línea posee una especie de fuerza centrípeta que hace converger a todos los actores del proceso educativo en un espacio central común, donde ya no hay distancia”. (Schwartzman, Tarasow, y Trech, M. (Comp.), 2019, p. 29).

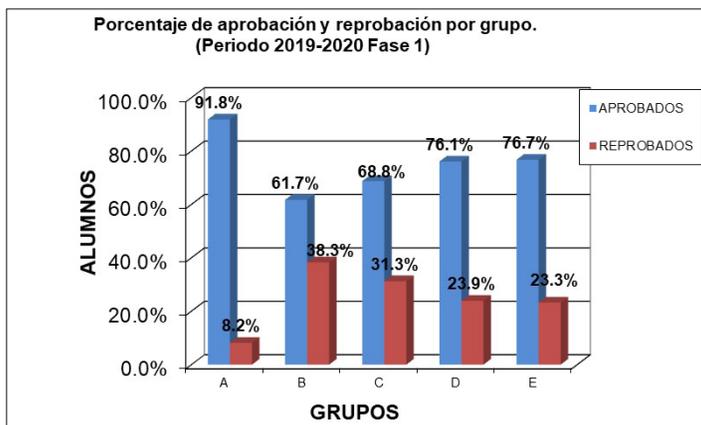
## 4 RESULTADOS

Los resultados obtenidos demostraron que en las clases en línea se elevó el rendimiento escolar de los alumnos de la unidad de aprendizaje de física básica, que se imparte del tercer semestre de la escuela NVMG de la UAC, esto se comprobó a través de los índices de aprobación, reprobación y promedio de aprovechamiento escolar.

Comenzaremos por analizar de manera individual los dos periodos y posteriormente hacemos la comparación de ambos.

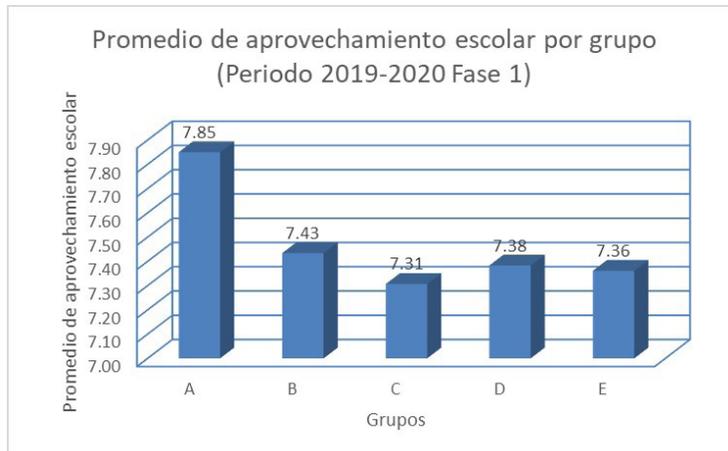
En la gráfica 1 se observa la aprobación y reprobación por medio de los porcentajes grupales, en el periodo 2019-2020 (periodo en el cual las clases fueron presenciales) indican que en los 5 grupos del turno matutino el porcentaje de aprobación siempre es mayor que el de reprobación. En el grupo A el porcentaje de aprobación llega hacer del 91.8%. En cuanto a la reprobación el grupo B reporta el mayor porcentaje con 38.3%.

Gráfica 1. Porcentaje de aprobación y reprobación en el periodo 2019-2020 Fase 1.



En este mismo periodo 2019-2020 (gráfica 2) se observó que los promedios de aprovechamiento escolar por grupo fueron por debajo de 8, siendo el grupo A el que obtiene el mayor promedio aprobatorio (7.85). Cabe mencionar que las tareas como los organizadores gráficos se podían realizar a mano (de puño y letra), pero también si se deseaba realizar con medios electrónicos.

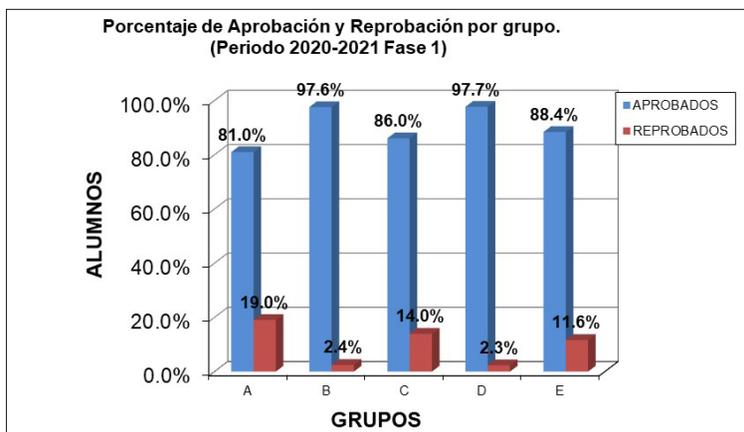
Gráfica 2. Promedio de aprovechamiento escolar por grupo en el periodo 2019-2020 Fase 1.



En el periodo 2020-2021 fase 1 las clases fueron 100% en línea, las tareas y las evaluaciones fueron de manera digital. Los recursos utilizados como los videos donde se encontraba la explicación de cómo resolver los problemas, estaban a disposición del alumno en cualquier momento y podía revisar el material las veces que fuese necesario para su aprendizaje.

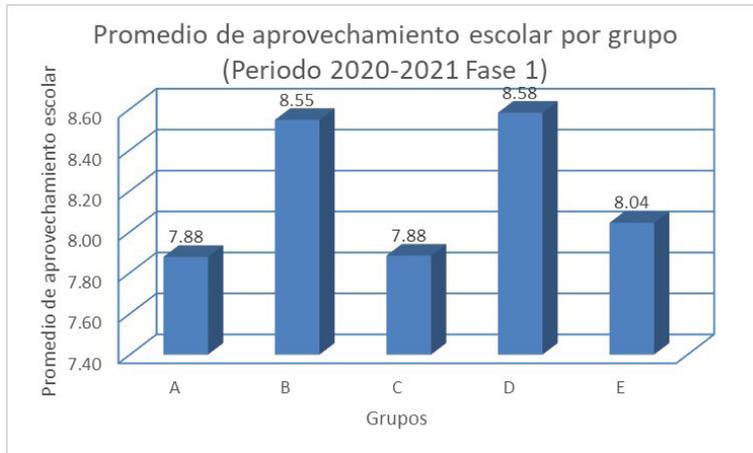
En la gráfica 3 se puede analizar los porcentajes de aprobación y reprobación, en todos los grupos el porcentaje de aprobación es mayor que el de reprobación. El grupo B y D son los que tienen el mayor porcentaje de aprobación con el 97.6% y 97.7% respectivamente.

Gráfica 3. Porcentaje aprobación y reprobación por grupo en el periodo 2020-2021 Fase 1.



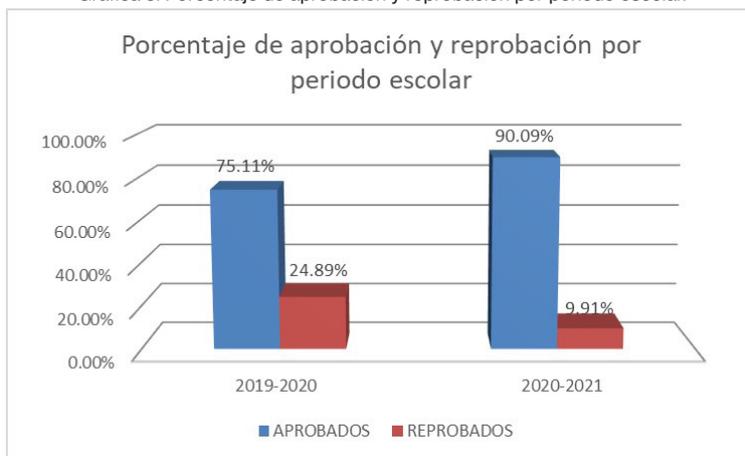
En relación con los promedios de aprovechamiento escolar por grupo (Gráfica 4) tenemos que todos los grupos lograron un promedio aprobatorio siendo los grupos B y D con los mayores promedios de 8.55 y 8.58.

Gráfica 4. Promedio de aprovechamiento escolar por grupo en el periodo 2020-2021 Fase 1.



Comparando ambos periodos escolares vemos que el porcentaje de aprobación aumentó (Gráfica 5) considerablemente, en el periodo 2019-2020 se tenía un porcentaje de aprobación del 75.11%, en comparación con el periodo 2020-2021 que se tiene un porcentaje del 90.09% el porcentaje aumento en un 14.98%. Así mismo el porcentaje de reprobación disminuyó del 24.89% (2019-2020) hasta un 9.91% (2020-2021).

Gráfica 5. Porcentaje de aprobación y reprobación por periodo escolar.



Comparando los promedios de aprovechamiento escolar por periodo, tenemos que hubo un aumento significativo. Esto nos hace pensar que las clases en línea fueron muy bien aceptadas por los alumnos repercutiendo en su rendimiento escolar. Se observa que el periodo 2019-2020 el promedio de aprovechamiento era de 7.5, mientras que el periodo 2020-2021 este se incrementa a 8.2.

## 5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Las expectativas que se tenían para este estudio dieron buenos resultados, al inicio de la investigación se preguntaba si el cambio de modalidad presencial a virtual impactaba en el rendimiento escolar de la unidad de aprendizaje de física básica, este rendimiento se mide a través de los índices de aprobación, reprobación y aprovechamiento escolar, los datos obtenidos indican que, si hay un impacto de manera positiva, encontrando que los alumnos de la escuela preparatoria NVMG aumentaron en un 14.98% el índice de aprobación. Se tenía un porcentaje de aprobación del 75.11%, en el periodo 2019-2020 fase 1, durante las clases presenciales y este aumento a un 90.09% en las clases a distancia en el periodo 2020-2021 fase 1. Castillo Maita (2020) en un estudio realizado para establecer el impacto de las plataformas virtuales en el rendimiento académico de los estudiantes de la Unidad Educativa Mariano Cobo Barana

en el segundo año de bachillerato ciclo 2019-2020, de la ciudad de Ambato en Ecuador, concluye que el 80% de los estudiantes se encontró una mejoría en sus calificaciones por el uso de las plataformas virtuales dando un promedio general entre excelente y muy bueno en un puntaje cuantitativo.

Cabe mencionar que la mayoría de las tareas en el periodo donde las clases fueron presenciales se realizaban en el salón de clases donde el docente supervisaba el desarrollo, así mismo las evaluaciones eran estandarizadas y en un mismo día y hora se presentaba el examen, mientras que en el periodo de la modalidad a distancia las tareas se fueron elaboradas por el alumno de manera digital, así como sus exámenes. Podemos reflexionar que quizá en este periodo presencial el proceso enseñanza-aprendizaje era más conductista, donde el alumno escuchaba la explicación del docente, pero no tenía oportunidad de volver a escuchar la explicación. Para Kurki-Suonio y Hakola (2007) citado por Cruz Ardila y Espinosa Arroyave (2012, p.109) menciona que la enseñanza de la física sigue siendo conductista, es decir, el profesor primero trabaja la teoría programada en clase y posteriormente realiza los ejercicios y no llega a la verdadera comprensión de los fenómenos. En la modalidad a distancia el alumno posee recursos como son los vídeos que puede volver a ver las veces que el considere necesario para su aprendizaje.

En el periodo donde las clases son a distancia el alumno tomo las clases en sus hogares y con los medios disponibles, López, Barreto, Mendoza y del Salto (2015) mencionan que para lograr un rendimiento escolar adecuado es importante un ambiente familiar con estimulación perceptiva, psicológica y social, que lleve a experiencias de interacción estimulando y facilitando el desarrollo del pensamiento. Para impactar el rendimiento escolar de los alumnos es necesario analizar múltiples factores como son los socioeconómicos, los psicológicos, el contexto familiar, los motivacionales, los tecnológicos, etc.

Si hablamos del aprovechamiento escolar por grupo, Alvarez-Herrero, J. F., y Hernández Ortega, J. (2020), realizaron un estudio en la Universidad de Alicante en España, en la asignatura: Didáctica del conocimiento del medio natural, encontrando que de manera presencial la calificación global del grupo fue de 6.7 mientras que de manera online se obtuvo una calificación del 8.8 mejorando considerablemente. En nuestro estudio los resultados son similares ya que se midió el aprovechamiento escolar por grupo y por periodo teniendo que el periodo 2019-2020 (presencial) fue de 7.5 mientras que en el 2020-2021 fue de 8.2 habiendo mejorado el promedio. Hemos encontrado que los jóvenes al recibir sus clases de manera virtual logran mejorar sus calificaciones y reprueban en menor cantidad, los medios electrónicos utilizados creemos facilitan la realización de sus tareas, sin embargo, será necesario seguir realizando investigaciones.

## 6 CONCLUSIONES

En conclusión el cambio de modalidad presencial a virtual implementado por la pandemia de COVID-19, ha impactado el rendimiento escolar de la unidad de aprendizaje de física básica de la escuela preparatoria NVMG de la UAC, logrando incrementar el índice de aprobación en un 14.98% , podemos pensar que al utilizar la tecnología los alumnos, que son jóvenes entre los 15 y 18 años de edad, estaban acostumbrados a usar estos medios y les fue más fácil adaptarse al cambio, quizá en un principio tenían cierta incertidumbre pero una vez inmersos en el proceso enseñanza-aprendizaje utilizaron sus habilidades digitales para seguir aprendiendo a distancia.

Se necesita seguir investigando para saber el sentir de los alumnos ante esta modalidad y detectar las carencias y oportunidades que se puedan tener.

Los resultados obtenidos en esta investigación ha demostraron que en las clases en línea en el periodo 2020-2021 fase 1 se elevó el rendimiento escolar de los alumnos de la unidad de aprendizaje de física básica, que se imparte del tercer semestre de la escuela NVMG de la UAC, esto se comprobó a través de los índices de aprobación, reprobación y promedio de aprovechamiento escolar, tan solo en el índice de reprobación este disminuyó en un 14.98% y de un promedio de aprovechamiento escolar de 7.5 obtenido en el periodo 2019-2020, se obtuvo un 8.2 en el periodo 2020-2021.

Hay que aclarar que esta modalidad nos funciona a nivel preparatoria, pero no podemos generalizar para todos los niveles educativos, ya que estamos conscientes que a nivel preescolar, primaria y secundaria puede ser distintos los resultados. Estamos en espera de que el periodo de confinamiento ante la pandemia termine, para así poder incorporarnos a las aulas y regresar de manera presencial, pero mientras que el riesgo de contagio este latente seguiremos enseñando y aprendiendo desde nuestras casas e implementando nuevas estrategias que impacten de manera positiva en el rendimiento escolar de nuestros jóvenes que son nuestros futuros profesionistas.

## REFERENCIAS

Alonso Díaz, L. y Blázquez Entonado, F. (2016). El docente de educación virtual: guía básica: incluye orientaciones y ejemplos del uso educativo de Moodle. Narcea Ediciones.

Alvarez-Herrero, J. F., y Hernández Ortega, J. (2020). Formación online versus formación presencial: evaluación y rendimiento académico del alumnado universitario. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10045/109591>

Area Moreira M., y Adell Segura, J. (2009). E-learning: enseñar y aprender en espacios virtuales. Tecnología Educativa. La formación del profesorado en la era de Internet, 391-424.

Ariza, C. P., Toncel, L. Á. R., y Blanchar, J. S. (2018). El rendimiento académico: una problemática compleja. Revista Boletín Redipe, 7(7), 137-141.

Barrios Gaxiola, M. I., y Frías Armenta, M. (2016). Factores que influyen en el desarrollo y rendimiento escolar de los jóvenes de bachillerato. *Revista Colombiana de Psicología*, 25(1), 63-82. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/804/80444652005.pdf>

García, G. R. (2008). *Glosario de Educación a distancia*. México: UNAM. Recuperado de: <http://www2.uned.es/catedraunesco-ead/varios/Glosario.pdf>

Coronel, P. C. P., Herrera, D. G. G., Álvarez, J. C. E., & Zurita, I. N. (2020). Las TIC como mediadoras en el proceso enseñanza-aprendizaje durante la pandemia del COVID-19. *Revista Arbitrada Interdisciplinaria Koinonía*, 5(1), 121-142.

Castillo Maita, I. A. (2020). *Las plataformas virtuales y el rendimiento académico de los estudiantes de la Unidad Educativa Mario Cobo Barona de la ciudad de Ambato (Bachelor's thesis, Universidad Técnica de Ambato-Facultad de Ciencias Humanas y de la Educación-Carrera de Psicología Educativa)*. Recuperado de: <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/31863>

Chon González, E. G. (2017). Factores que inciden en el rendimiento académico de los estudiantes de la Universidad Politécnica del Valle de Toluca. *Revista Latinoamericana de Estudios Educativos (México)*, 47(1), 91-108.

Cruz Ardila, J.C. y Espinosa Arroyave, V. (2012). Reflexiones sobre la didáctica en física desde los laboratorios y el uso de la TIC. *Revista Virtual Universidad Católica del Norte*, (35), p. 105-127. Recuperado de: <http://revistavirtual.ucn.edu.co/index.php/RevistaUCN/article/view/354>

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., y Batista Lucio, P. (2014). *Metodología de la Investigación*. 6ta. Edición. México: Editorial Mc Graw Hill.

Imig, P. G. (2020). Rendimiento académico: un recorrido conceptual que aproxima a una definición unificada para el ámbito superior. *Revista de Educación*, (20), 89-104.

Lamas, H. (2015). Sobre el rendimiento escolar. *Propósitos y Representaciones*, 3(1), 313-386. doi: <http://dx.doi.org/10.20511/pyr2015.v3n1.74>

López Mero, Patricia; Barreto Pico, Asunción; Mendoza Rodríguez, Eddy Rigoberto; Alberto del Salto Bello, Max Walter. (2015). Bajo rendimiento académico en estudiantes y disfuncionalidad familiar. *MEDISAN*, volumen 19. Recuperado de [http://medisan.sld.cu/index.php/san/article/view/440/html\\_146](http://medisan.sld.cu/index.php/san/article/view/440/html_146)

Míguez, M. E. (2020). Educación de Jóvenes y Adultos en tiempos de pandemia. Desafíos en torno a la inclusión digital. Recuperado de: <http://educaciondelamirada.com/wp-content/uploads/2020/05/Miguez-Maru-Educaci%C3%B3n-de-J%C3%B3venes-y-Adultos-en-tiempos-de-pandemia.pdf>

REAL ACADEMIA ESPAÑOLA: Diccionario de la lengua española, 23.<sup>a</sup> ed., [versión 23.4 en línea]. <https://dle.rae.es> [15 de diciembre de 2020].

Reimers, F. y Schleicher, A. (2020). Un marco para guiar una respuesta educativa a la pandemia del 2020 del COVID-19. Enseña Perú. Recuperado de: <https://segacademcb.cbachilleres.edu.mx/secciones/docs/gestion-escolar/Marco-para-guiar.pdf>

Salvatierra, V. (2020). Educación en tiempos de pandemia. *Estudios Públicos*, (159), 111-180.

Schwartzman, G. (Comp.), Tarasow, F. (Comp.) y Trech, M. (Comp.). (2019). *De la educación a distancia a la educación en línea: aportes a un campo en construcción*. Homo Sapiens Ediciones. <https://elibro.net/es/ereader/uacam/112908?page=18>

Verdún, N. (2016). Educación virtual y sus configuraciones emergentes: Notas acerca del e-learning, b-learning y m-learning. *Háblame de TIC*, 3, 67-88. Recuperado de: [https://www.uv.mx/blogs/brechadigital/files/2015/05/HdT3\\_Verd%C3%83%C2%BA.pdf](https://www.uv.mx/blogs/brechadigital/files/2015/05/HdT3_Verd%C3%83%C2%BA.pdf)

# CAPÍTULO 10

## MEJORAMIENTO DE LA FUERZA DE TRABAJO UTILIZANDO SIMULACION

Data de submissão: 23/12/2022

Data de aceite: 17/01/2023

### Dr. Jorge Tomás Gutiérrez Villegas<sup>1</sup>

Catedrático de Ingeniería Industrial  
Tecnológico Nacional de México  
Campus Parral

Hidalgo del Parral, Chihuahua, México

<https://orcid.org/0000-0003-2902-6020>

### MC María Leticia Silva Ríos

Catedrática de Ingeniería Industrial  
Tecnológico Nacional de México  
Campus Parral

Hidalgo del Parral, Chihuahua, México

<https://orcid.org/0000-0002-4989-0185>

### Dr. Edgar Omar Gutiérrez Villegas

Jefe del Departamento de  
Recursos Humanos

Tecnológico Nacional de México  
Campus Parral

Hidalgo del Parral, Chihuahua, México

**RESUMEN:** El volumen de empleo generado por industrias maquiladoras está basado principalmente en la utilización intensiva de mano de obra. El uso eficiente de los recursos humanos es prioridad como indicador de productividad laboral, esto último hace

<sup>1</sup> autor corresponsal.

necesario contar con estaciones de trabajo equilibradas, estandarizadas, y en condiciones ergonómicas excelentes. El empleo de modelos de simulación genera beneficios en los costos de producción, impactando de manera considerable el nivel de utilidades. Se presentó un modelo de simulación que fue empleado para determinar el nivel de mano de obra requerido en una empresa manufacturera. La metodología utilizada consistió en la toma de tiempos en estaciones de trabajo, posteriormente se determinaron las cargas de trabajo en las líneas de manufactura y se analizaron sus indicadores a través de un modelo de simulación. El presente modelo ayudó a mejorar la utilización de la fuerza de trabajo mejorando líneas de producción, rediseñando los métodos de trabajo, ya que con el mismo volumen de producción, fue posible reducir la plantilla laboral un 22.7%, generando ahorros de \$50,000 dólares anuales e incrementos considerables en porcentajes de eficiencia de labor en actividades que agregan valor al producto y por las cuales el cliente está dispuesto a pagar.

**PALABRAS CLAVE:** Modelos de simulación. Fuerza de trabajo. Líneas de producción. Métodos de trabajo.

### WORKFORCE IMPROVEMENT USING SIMULATION

**ABSTRACT:** The volume of employment generated by maquiladora industries is based

mainly on the intensive use of labor. The efficient use of human resources is a priority as an indicator of labor productivity, the latter makes it necessary to have balanced, standardized workstations, and in excellent ergonomic conditions. The use of simulation models generates benefits in production costs, considerably impacting the level of profits. A simulation model was presented that was used to determine the level of labor required in a manufacturing company. The methodology used consisted of taking times at workstations, then the workloads in the manufacturing lines were determined and their indicators were analyzed through a simulation model. This model helped to improve the use of the workforce by improving production lines, redesigning work methods, since with the same volume of production, it was possible to reduce the workforce by 22.7%, generating savings of \$50,000 dollars per year and considerable increases in labor efficiency percentages in activities that add value to the product and for which the customer is willing to pay.

**KEYWORDS:** Simulation models. Work force. Production lines. Work methods.

## 1 INTRODUCCIÓN

En los tiempos actuales las empresas en sus procesos productivos tienen requerimientos altos de competitividad y son cada vez más complejos. El diseño de procesos productivos con utilización intensiva de mano de obra son cada vez más frecuentes en la industria de producción en masa con la máxima calidad a un costo y tiempo de respuesta que sean los mínimos para lograr ser lo más competitivo posible. Una herramienta altamente utilizada para mejorar sistemas y procesos es la simulación. Un modelo de simulación, es una representación de un objeto, sistema, o idea. Usualmente, su propósito es ayudar a explicar, entender o mejorar un sistema (Shannon, 1998). La simulación es una técnica para imitar de manera digital el comportamiento de un sistema real bajo ciertas condiciones de operación. El empleo de modelos de simulación presta un invaluable servicio en los procesos de manufactura permitiendo una selección adecuada de mano de obra, utilización de estaciones de trabajo, niveles de inventario, materiales, siendo una herramienta excelente para determinar el tiempo requerido en los modelos reales.

Azarang (1997) indica que el desarrollo de un modelo incluye la construcción de ecuaciones lógicas representativas del sistema y la preparación de un programa computacional. Desarrollar un modelo involucra a una parte de la organización y proporciona una gran perspectiva de lo que ocurre y cuáles son los cambios más convenientes que tienen y/o deben hacerse para alcanzar los objetivos planteados y de esta forma se puedan lograr beneficios que se traduzcan en mejores índices de productividad y rendimientos financieros.

Una vez que se ha sido validado y verificado el modelo, la siguiente parte es la experimentación con el modelo, esto es con el propósito de analizar y determinar cuáles son los cambios que producen resultados más significativos en los niveles de algunas de las variables de entrada. Kelton et al. (2008) afirman que las personas a menudo estudian un sistema para medir su desempeño, mejorar su operación, o diseñarlo si es que no existe y en todo caso están interesados en tener una ayuda disponible para las operaciones y tomar decisiones, respecto a qué hacer para que los resultados sean los mejores, un modelo de simulación computacional se ejecuta para responder preguntas acerca del modelo real y conocer su comportamiento, situación que hace a la simulación una herramienta poderosa, flexible y versátil. García et al. (2005) dice que el objeto del modelo simulado es permitir al analista la determinación de uno o más cambios en los aspectos del sistema modelado o inclusive la totalidad del sistema, también le permiten desarrollar escenarios de la efectividad de la operación siguiendo la línea de pensamiento de análisis “que pasa si...”

Meyers y Stephens (2006) reconocen que la simulación se está convirtiendo en parte integral del proceso de planeación y toma de decisiones del segmento de manufactura y servicios en la industria de Estados Unidos, como resultado de la dinámica del mercado y la competencia global intensa, las empresas fabricantes de artículos y las que prestan servicios se ven forzadas a proporcionar una mejor calidad, sobre la base de eficiencia en el costo, al mismo tiempo que tratan de reducir en forma significativa el tiempo de producción o atención. Una de las principales razones de la popularidad de la simulación es su capacidad y facilidad para elaborar modelos muy complicados de sistemas, con el advenimiento de las computadoras y softwares especializados se ha hecho aún más rentable, logrando resultados rápidos y confiables.

Existen diversos lenguajes de simulación de propósito particular. Kelton et al (2008) señala que los lenguajes de simulación se hicieron muy populares, mas sin embargo hay que invertir tiempo para aprender sobre sus características y su uso eficaz. Uno de los paquetes de software comercial más usados es el ProModel. García et al. (2006) Menciona que ProModel cuenta con herramientas de análisis y diseño que, unidas a la animación de los modelos bajo estudio, permiten al analista conocer mejor el problema y alcanzar resultados más confiables respecto de las decisiones a tomar. Básicamente este producto se enfoca a procesos de fabricación.

## 2 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO

### 2.1 ANTECEDENTES

La empresa motivo del estudio está ubicada en el sur del estado de Chihuahua, cuenta con varias líneas de producción teniendo como problema principal, muchos movimientos innecesarios de los operadores y una plantilla laboral con tiempos ociosos, provocando una gran variación en el proceso y en la utilización de mano de obra, repercutiendo de manera directa en los indicadores de utilización del recurso humano y en la productividad de las líneas. Debido a que la empresa mostraba una baja productividad, se buscaron áreas de oportunidad, en lo que son tiempos muertos, tiempos de espera y caminates en las líneas de producción involucradas para optimizar personal directo y así cumplir con el parámetro establecido de los índices de productividad de la planta, un mejor aprovechamiento del tiempo efectivo de trabajo y una utilización del recurso humano de forma tal, que cumpla con esquemas y parámetros de clase mundial, así como en todas aquellas áreas que se vean afectadas directamente con estos cambios.

### 2.2 METODOLOGÍA UTILIZADA

La metodología utilizada consistió en la toma de tiempos en estaciones de trabajo (tiempos de ciclo, tiempos del elemento y transportes). Posteriormente se determinaron las cargas de trabajo en las líneas de manufactura y se analizaron sus indicadores. Con el empleo de un paquete computacional (ProModel), se diagnosticó y mejoró la utilización del recurso humano, rediseñando los métodos de trabajo que se encontraban en ese momento vigentes en las líneas 1 y 2.

Se realizaron cinco tomas por operador ya que se consideró que el operario ha alcanzado su curva de aprendizaje. El objetivo fue recolectar los datos necesarios para recabar la información y analizarla para determinar la situación en la que se encontraban todas y cada una de las estaciones de trabajo de las líneas involucradas, y así determinar si cada operador alcanzaría a cumplir con la carga de trabajo asignada en tiempo y forma, y de ser necesario tomar las medidas necesarias para cumplir con las cuotas solicitadas. Además de considerar los objetivos planteados donde se pretendía reducir los desperdicios al máximo posible.

### 2.3 SITUACIÓN BASE

La Tabla 1 muestra los tiempos tomados en la línea 1 antes de realizar el análisis con un volumen de producción solicitado de 244 piezas, mientras que la tabla 2 lo hace para la línea 2.

Tabla 1. Datos de tiempos antes del análisis de la línea 1.

Línea 1 (antes)											
Workstation	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Element time (sec)	105	106	103	100	103	105	98	103	99	102	1024
Walking time (seg)	1	1	1	1	2	1	2	1	1	1	12
Cycle time (sec)	106	107	104	101	105	106	100	104	100	103	1036
Waiting time (sec)	20	19	22	25	21	20	26	22	26	23	224

Tabla 2. Datos de tiempos antes del análisis de la línea 2.

Línea 2 (antes)													
Workstation	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Total
Element time	96	91	195	85	104	91	96	98	98	37	35	104	1130
Walking time	1	1	1	2	2	1	1	0	1	1	1	4	16
Cycle time	97	92	196	87	106	92	97	98	99	38	36	108	1146
Waiting time	29	160	0	39	20	34	29	28	27	88	90	18	492

La Figura 1 y 2 muestran la utilización de la mano de obra en la línea 1 y 2 respectivamente sin incrementar el nivel de producción en la situación inicial.

Figura 1. Utilización de mano de obra línea 1.

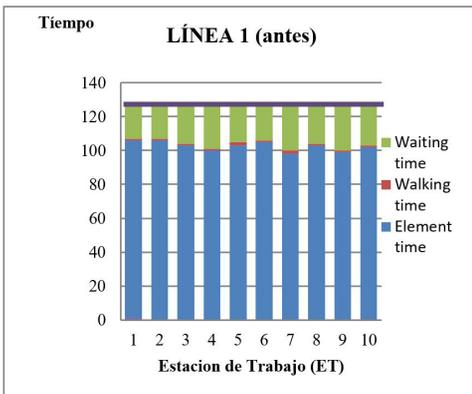
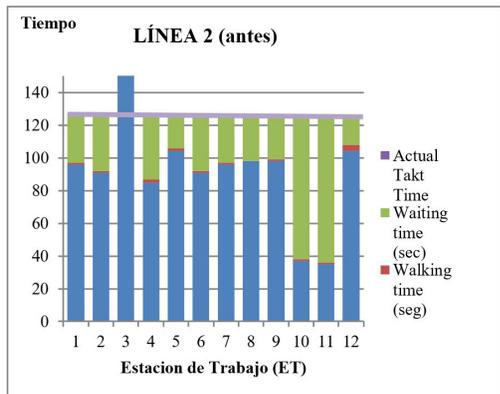


Figura 2. Utilización de mano de obra línea 2.



Una de las acciones con las que se continuó después de la toma de tiempos, fue el análisis de las cargas de trabajo de cada uno de las estaciones de trabajo mediante la creación de un modelo de simulación. La Figura 3 y 4 muestran la información general de la simulación para producir las 244 piezas se requiere de 7.513 horas para la línea 1, mientras que para la línea 2 fue necesario 13.55 horas.

Figura 3. Información General Simulación línea 1.

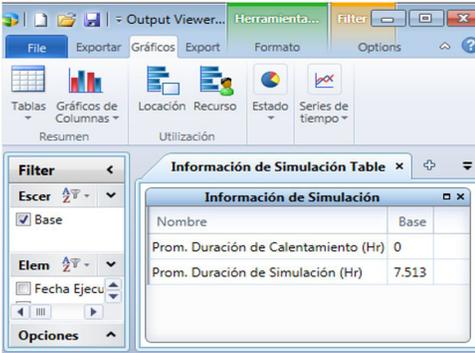
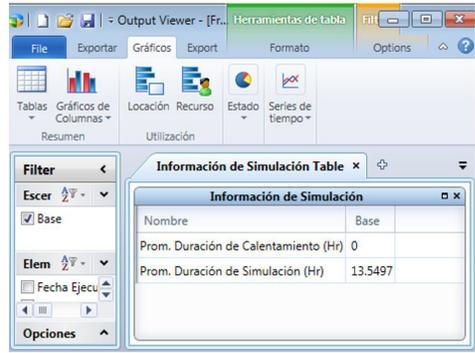


Figura 4. Información General Simulación línea 2.



Las figuras 5 y 6 muestran el tiempo promedio que pasó el producto en el sistema, así como el tiempo requerido en operación y en movimiento (transporte). Estos resultados permiten validar el sistema simulado respecto al real, se puede verificar la correspondencia entre los valores reales y los valores simulados principalmente de tiempo en operación y en movimiento. El análisis de cargas de las estaciones de trabajo de la línea 1 y 2 arrojó los valores que se muestran en las Figuras 7 y 8. Es importante hacer notar que la línea 2 presenta un desbalanceo considerable en las estaciones de trabajo indicando una subutilización de la mano de obra, principalmente en las estaciones de trabajo 10, 11 y una sobre utilización en la estación de trabajo 3, representando esto un área de oportunidad considerable que requiere ser valorada y corregida para mejorar el aprovechamiento de la fuerza de trabajo. Es importante resaltar que el costo promedio anual de la utilización de un trabajador es de \$5,000 dólares.

Figura 5. Resumen del producto línea 1.



Figura 6. Resumen del producto línea 2.

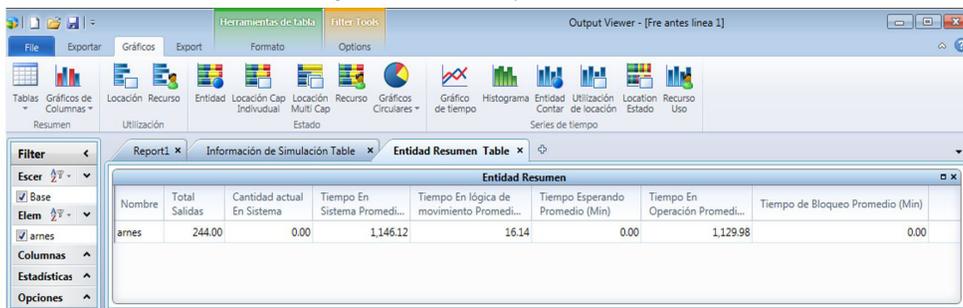


Figura 7. Análisis de carga de las ET línea 1.

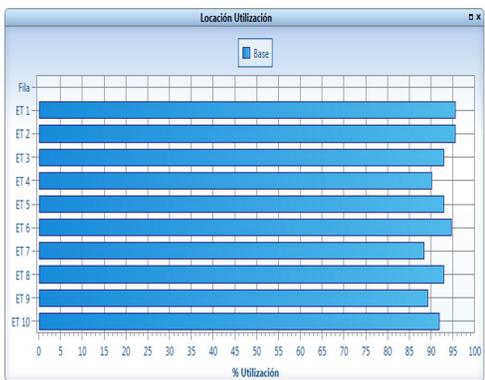
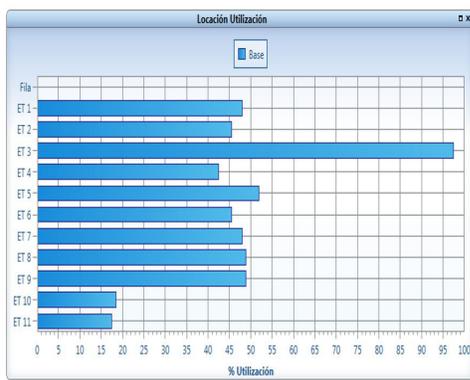


Figura 8. Análisis de carga de las ET línea 2.



El análisis de las cargas de trabajo dio pauta para realizar la propuesta de modificación de métodos de trabajo de las líneas de producción en cuestión. La propuesta de los tiempos expresados en segundos por estación de trabajo para la línea 1 y línea 2 se muestran en las Tablas 3 y 4 respectivamente.

Tabla 3. Propuesta de tiempos Línea de producción 1.

Workstation	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Element time	116	114	114	113	113	113	112	116	113	1024
Walking time	1	1	1	1	2	1	2	1	1	11
Cycle time	117	115	115	114	115	114	114	117	114	1035

Tabla 4. Propuesta de tiempos Línea de producción 2.

Workstation	1	2	3	4	5	6	7	8	TOTAL
Element time	115	113	111	117	114	112	111	113	1019
Walking time	1	1	1	2	2	1	1	0	9
Cycle time	116	114	112	119	116	113	112	113	1028

Se elaboró un modelo de simulación basado en los desarrollados para analizar el modelo real y en la propuesta de las líneas de producción 1 y 2. Los valores arrojados de utilización de las estaciones de trabajo para cubrir la cuota de producción solicitada en las líneas 1 y 2 son mostrados en la figura 9 y 10 respectivamente.

Figura 9. Utilización de las Estaciones de Trabajo Línea 1.

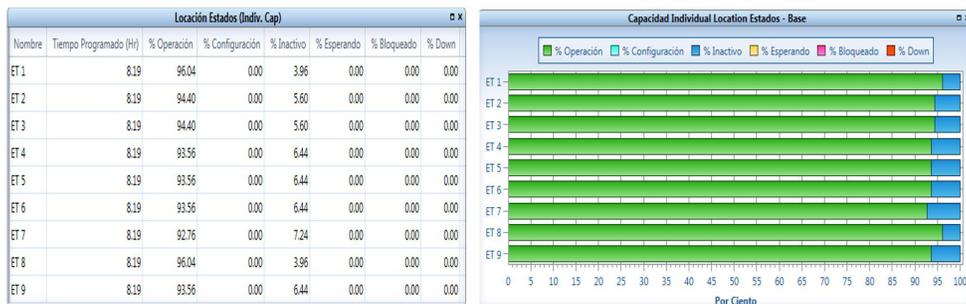
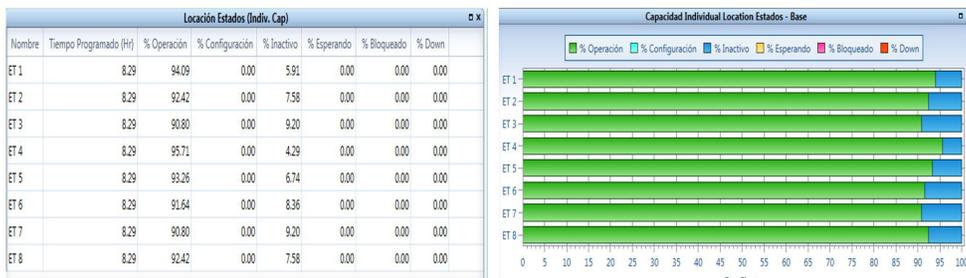


Figura 10. Utilización de las Estaciones de Trabajo Línea 2.



### 3 COMENTARIOS FINALES

#### 3.1 RESULTADOS

Para conocer el ahorro obtenido se revisaron las tablas de puntos piezas que es donde marca la cantidad de gente que se necesita por línea de trabajo y que es lo que el cliente paga para producir las piezas, este proyecto generó un ahorro total de 5 operadores (1 operador en la línea 1, 4 operadores en la línea 2 por turno), totalizando 10 operadores en los dos turnos de trabajo, que representa un ahorro de \$50,000 dólares anuales (\$5,000 dólares por operador), en consecuencia mayores utilidades y más productivos los códigos del producto elaborado. Para este caso se trabajó con el mismo volumen de producción, se elaboraron nuevos métodos de trabajo y se logró una reducción de la plantilla laboral un 22.7% en las líneas 1 y 2.

Al efectuar una toma de tiempos adecuada en cada una de las líneas del área de manufactura donde se analizó, diagnóstico y mejoró la utilización del recurso humano,

revisando los métodos de trabajo que se encontraban en ese momento, se optimizaron las diferentes áreas de la línea de producción, en relación a la reducción de caminares y balanceo de cargas de trabajo, teniendo como consecuencia una actualización en cada método de trabajo de las líneas.

Para este caso se actuó con el mismo volumen de producción, de tal manera que se redujo la plantilla laboral en las líneas 1 y 2. Al realizar cualquier tipo de modificación o actualización en el layout de las diferentes líneas, se tomaron siempre en cuenta diferentes situaciones, una de ellas fueron los caminares y cargas de trabajo demasiado pesadas para el operario.

### 3.2 CONCLUSIÓN

Tomando en cuenta que en la empresa su finalidad es contar con la total satisfacción del cliente se obtuvieron buenos resultados ya que se pudo reducir la plantilla laboral un 22.7%, lo cual esto le trae más ganancias a la empresa realizando diversas actividades para la solución a esta problemática, implementando varios objetivos y analizando la situación en la que se encontraba la empresa.

La administración de las cargas de trabajo en las estaciones en las líneas 1 y 2 redujo problemas comunes en la empresa como fueron tiempos de espera y caminares, logrando un incremento en la eficiencia de labor (productividad), repercutiendo de manera directa en un mayor aprovechamiento del recurso humano.

### 3.3 RECOMENDACIONES

Al realizar un rebalanceo es importante tener siempre en mente el tiempo necesario para cumplir con lo requerido en la fecha establecida. En cuanto al área de trabajo es recomendable, tomar en cuenta la fisiología de los operadores. Se debe procurar implementar una mentalidad en los operadores para que se guíen conforme al método de trabajo, al realizar su tarea, ya que en ocasiones el trabajador sigue su propio método pensando que avanza más rápido o más sencillo cuando en realidad no es así. Es necesario situar a la persona apropiada para cada puesto, ya que en muchas ocasiones la persona titular para cada área no es precisamente la más eficiente debido a sus características físicas.

### 3.4 TRABAJOS PENDIENTES

El proyecto da lugar a que se puedan analizar de manera más detallada las actividades que se realizan en las líneas de producción 1 y 2: Como determinar el porcentaje

de actividades que agregan valor al producto para que cumplan con los parámetros de clase mundial y objetivos de la empresa. Además la proliferación de modelos de simulación en las distintas áreas de la empresa y su respectivo análisis de operaciones tanto de actividades que agregan valor ( $\Sigma ET$ ) y de actividades indispensables que se realizan ( $\Sigma CT$ ).

## REFERENCIAS

Azarang, Mohammad R., García Dunna, Eduardo, *Simulación y análisis de Modelos estocásticos*. Primera Edición, Mc Graw Hill Interamericana Editores S.A. de C.V., México, D.F., 1996.

García Dunna Eduardo, García Reyes Heriberto, Cárdenas Barrón Leopoldo Eduardo, *Simulación y análisis de sistemas con ProModel*, Segunda Edición, Pearson Educación, México, 2013.

García Mora Francisco, Sierra Acosta Jorge, Guzmán Ibarra Ma. Virginia, *Simulación de sistemas para administración e ingeniería*, Primera edición, Compañía Editorial Continental, 2005.

Kelton W. David, Sadowski Randall P., Sturrock, David T., *Simulación con software Arena*, Cuarta edición, Mc Graw Hill/Interamericana editores, S.A. de C.V., 2008.

Meyers, Fred E. y Stephens, Matthew P., *Diseño de instalaciones de manufactura y manejo de materiales*, Tercera Edición, Pearson Educación, México 2006.

# CAPÍTULO 11

## LA PERSPECTIVA DE GÉNERO EN LAS CIUDADES ESPAÑOLAS. UN ANÁLISIS EXPLORATORIO

Data de submissão: 01/02/2023

Data de aceite: 16/02/2023

**Bárbara Atanes Delgado**<sup>1</sup>

Técnica de Igualdad  
Ourense, España

**Xosé Somoza Medina**<sup>2</sup>

Geógrafo  
Universidad de León, España  
<https://orcid.org/0000-0002-0857-3837>

**RESUMEN:** Las ciudades españolas, al igual que otras ciudades en el mundo, han llevado a cabo en los últimos años actuaciones concretas

<sup>1</sup> **Bárbara Atanes Delgado.** (Ourense, 1976). Diplomada en Gestión y Administración Pública por la Universidad de León, Posgrado en Educación Secundaria por la Universidad de Vigo y Master en Igualdad y Educación por la Universidad de Santiago de Compostela. Desarrolló parte de su labor profesional como Técnica de Igualdad en la ciudad de Ourense e impartiendo cursos de sensibilización y prevención contra la violencia de género en diferentes localidades de Galicia. Profesora de Formación Profesional interina.

<sup>2</sup> **Xosé Somoza Medina.** (Ourense, 1969). Doctor en Geografía e Historia por la Universidad de Santiago de Compostela. Profesor Titular de Geografía Humana en la Universidad de León, donde fue Director del Departamento de Geografía y Geología entre 2004 y 2008 y Director Académico de la Escuela de Turismo entre 2005 y 2008. Entre 2008 y 2009 ejerció como Director del Centro de Innovación y Servicios de la Xunta de Galicia en la ciudad de Ferrol. En 2012 fue Director General de Rehabilitación Urbana del Ayuntamiento de Ourense.

con perspectiva de género. La ciudad igualitaria no existe, pues la sociedad patriarcal continúa siendo el esquema normativo sobre el que se cimientan todos los demás comportamientos y actos de nuestra especie. No obstante, siguiendo declaraciones internacionales y modificaciones legislativas, la situación de desequilibrio trata de mitigarse a través de proyectos y programas pioneros que introducen el cuestionamiento sexista en la ciudad. En este capítulo se detallan los episodios y hechos más reseñables de la relación entre ciudad y género en el caso español, con especial énfasis en los efectos normativos de la aprobación de la Ley de Igualdad Efectiva de 2007, que en su artículo 31.3 establece la obligación de las Administraciones públicas de introducir la perspectiva de género en la definición y ejecución del planeamiento urbanístico. En este contexto, se analizan diez ejemplos de ciudades españolas que han realizado actuaciones concretas en este ámbito: Albacete, Barcelona, Córdoba, A Coruña, Fuenlabrada, Gijón, Granollers, Irún, Pamplona y Valencia.

**PALABRAS CLAVE:** Ciudad igualitaria. Perspectiva de género. Urbanismo no sexista. España. Feminismo en la ciudad.

### 1 INTRODUCCIÓN

España no es un país que destaque por su cultura igualitaria entre mujeres y hombres. No obstante, existen elementos positivos en la

historia reciente que pretenden modificar los prejuicios y estereotipos tradicionales de una sociedad patriarcal y conservadora. La ciudad española no es igualitaria, como tampoco lo es ninguna ciudad en ningún otro país del mundo, aunque podamos nombrar algunos ejemplos que llevan décadas trabajando desde diferentes ámbitos para acercarse a este ideal. El sistema patriarcal domina en nuestra civilización y los escasos ejemplos de otros sistemas diferentes forman parte de la mitología o del estudio antropológico de tribus perdidas. Pero esta afirmación no significa que deba seguir siguiendo así en el futuro. Por el bien de las próximas generaciones debemos construir un nuevo sistema de relaciones basado en la igualdad, el respeto y la inclusión.

La mayoría de las ciudades españolas cuentan con Planes de Igualdad aprobados desde sus respectivos gobiernos municipales. En algunas de ellas, la experiencia temporal supera las tres décadas, con diferentes revisiones y nuevos períodos de vigencia, y existen ejemplos de Planes elaborados por corporaciones de muy distinto signo político. Ahora bien, los casos en que los Planes de Igualdad han sido capaces de trascender el ámbito administrativo y provocar un cambio en la ciudad introduciendo la perspectiva de género en el diseño urbano son muy escasos.

Desde 1979, cuando se crea la primera concejalía de mujer en un ayuntamiento español, hasta hoy, los gobiernos locales, autonómicos y estatales han aprobado leyes, programas y planes de igualdad de todo tipo. Si bien, muchos de estos documentos de planificación municipal no pasan de las notas de prensa oficiales del día de su presentación, pues no existen presupuestos para llevar a cabo las actuaciones programadas ni personal formado que pueda desarrollarlas. ¿Qué ha ocurrido entonces con las buenas prácticas de igualdad que en 2007 y 2008 salpicaban la geografía española? Pues que la crisis económica y los consiguientes recortes públicos primero y la pandemia y la crisis sanitaria después, sacaron la conquista de la ciudad igualitaria del debate político, cortando de raíz muchos proyectos esperanzadores.

La ciudad ha sido analizada con perspectiva de género en diferentes artículos desde la década de los años 1970, a partir de obras pioneras de geógrafas feministas (Hayford, 1974; Beechey, 1977; Rose, 1978) que denunciaban como la separación de funciones que preconizaba el zonning y la ciudad racional de Le Corbusier, perjudicaban gravemente a las mujeres. La tesis pionera de G. Valentin (1989) sobre el miedo de las mujeres a la violencia en los espacios públicos es precursora de un amplio número de trabajos sobre violencia machista y ciudad (Pain, 1997; Miller, 2008; Monqid, 2012; Soto, 2012; Falú, 2014). Otros aspectos que se han estudiado han sido el de la participación de las mujeres en los procesos de planificación y renovación urbana (Rahder y Altília,

2004; Sánchez, 2004; Ortiz, 2007; Spain, 2014), la relación entre género, transporte y movilidad urbana (Guasch, C. M., 1998; Tobío, 2000; Secor, 2002) o el derecho a la ciudad en la vida cotidiana de las mujeres (Vaiou y Lykogianni, 2006; Kihato, 2013; Ciocoletto, 2014; Beebejaun, Y., 2016.).

El análisis empírico de la mayoría de las ciudades analizadas que han llevado a cabo dinámicas de cambio urbano con perspectiva de género, muestra como la aplicación del denominado *mainstreaming* es una tarea complicada y muchas veces fallida (Verloo, 2001; Jarvis, Cloke y Kantor, 2009; Sánchez y Roberts, 2013). Se trata de actuaciones parciales que desarrollan un determinado aspecto, bien la concienciación del problema real existente, el fomento de la participación de las mujeres en los procesos de toma de decisión, el diseño de espacios urbanos igualitarios, la aplicación del género al sistema de transportes públicos urbanos o al nombre de calles y espacios públicos, o el incremento de la seguridad percibida por las mujeres mejorando determinados lugares de la ciudad a través acciones como los denominados mapas del miedo (Condon, Lieber, y Maillochon, 2007; Muxí y Ciocoletto, 2011; Gutiérrez y Oto, 2020). Pero al ser aspectos puntuales y muchos de ellos sometidos a la coyuntura política de la dinámica electoral, los esfuerzos no se mantienen en el tiempo y son borrados rápidamente del imaginario colectivo. El carácter sexista de la ciudad se perpetúa porque las escasas acciones que se toman para rebatirlo son arrastradas por la corriente mayoritaria.

El presente capítulo pretende discutir la aplicación de la perspectiva de género en la ciudad, analizando ejemplos llevados a cabo en diferentes poblaciones de España, con el objetivo de aportar como conclusión una serie de buenas prácticas, a manera de decálogo, para avanzar en la creación de unas ciudades que no discriminen a las mujeres por el hecho de serlo, contribuyendo de esta manera a lograr dos objetivos de desarrollo sostenible de las Naciones Unidas: el 5, lograr la igualdad entre los géneros y empoderar a todas las mujeres y las niñas; y el 11, lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles, porque si se consigue el primero se obtendrá el segundo.

Para llegar a esa conclusión, este capítulo, que es una revisión y actualización de una comunicación presentada por los autores al XXV Congreso de la AGE, se propone primero describir los antecedentes y hechos reseñables en el ámbito español, europeo y mundial que han marcado la agenda de la ciudad igualitaria desde los años 70 del pasado siglo, para a continuación hacer un análisis específico de la legislación española que promueve la incorporación de la perspectiva de género en el planeamiento urbano. Después se analizan diez ejemplos de ciudades españolas que han realizado diferentes

acciones para mejorar la equidad entre sexos y finalmente se incluye un apartado de conclusiones que remata con un decálogo para continuar avanzando en la conquista de una ciudad no discriminatoria por razón de género.

## 2 IGUALDAD Y CIUDAD. ALGUNOS ANTECEDENTES, DECLARACIONES Y MOMENTOS CLAVES

El movimiento feminista en España, al igual que otras luchas por los derechos sociales, tiene sus antecedentes más recientes en el clima de libertad y democracia vivido en nuestro país tras la muerte del dictador Franco. Dos semanas después de su fallecimiento se celebraron en Madrid las primeras Jornadas por la Liberación de la Mujer, siguiendo el espíritu de reclamación de sus derechos que se había extendido globalmente con el Plan de Acción aprobado en la I Conferencia Mundial de la Mujer celebrado en México en 1975, declarado por las Naciones Unidas Año Internacional de la Mujer. Antes hubo en España grandes pioneras como Concepción Arenal Ponte, Emilia Pardo Bazán, Clara Campoamor Rodríguez o Carmen de Burgos, y cierta institucionalización en la II República (1931-1939), pero no es hasta la segunda mitad del siglo XX cuando la lucha por los derechos de las mujeres se convierte en un movimiento popular (Ramos, 2000).

En las primeras Jornadas Catalanas de la Mujer, celebradas en mayo de 1976 en el paraninfo de la Universidad de Barcelona, la segunda ponencia estuvo dedicada a “la mujer en los barrios” y ya entonces las dos grandes reivindicaciones fueron la creación de servicios colectivos y gratuitos (guarderías, centros de día) que permitiesen a la mujer trabajar fuera de casa y no reducirla a su rol de cuidadora y en segundo lugar lograr su participación plena en la vida política ciudadana.

Tras las elecciones municipales de 1979, las nuevas corporaciones democráticas y especialmente aquellas lideradas por partidos de izquierda recogieron las reivindicaciones feministas produciéndose en este mismo año su primera institucionalización municipal, al encargarse la socialista Teresa Colón de la Concejalía de la mujer de Alcobendas, una ciudad de la llamada periferia “roja” de Madrid. Fue gracias al trabajo de esta feminista, fallecida en 2015, que la ciudad madrileña se convirtió también en la primera en España en contar con un Plan de Igualdad municipal (1979) y una Casa de la Mujer. Precisamente el parque situado frente a este edificio público municipal lleva su nombre desde 2022.

En diciembre de 1979 las Naciones Unidas aprobaron la Convención sobre la eliminación de todas las formas de discriminación contra la mujer (CEDAW), revisada en 1981 y ratificada por España en 1984, en la que se menciona explícitamente la necesidad de atacar los patrones culturales que definen el ámbito público como un mundo masculino y

la esfera doméstica como el dominio de la mujer. Este documento constituye un referente del compromiso por la igualdad de los países y tiene validez jurídica.

En los años 1980 las concejalías de Igualdad se multiplicaron en los ayuntamientos españoles y la victoria del PSOE en las elecciones generales de 1982, supuso un año después, en 1983, la creación del Instituto de la Mujer. Este Instituto nació con la finalidad de promover y fomentar las condiciones que posibilitasen la igualdad social de ambos sexos y la participación de las mujeres en la vida política, cultural, económica y social. Uno de los instrumentos para alcanzar este objetivo fueron los Planes de Igualdad de Oportunidades de las Mujeres (PIOM) que, siguiendo modelos europeos, se pretendía propagar a todas las administraciones. El I PIOM, presentado en septiembre de 1987, abarcaba el período 1988-1990 y desde entonces se aprobaron cinco planes más, aunque nunca ha habido una verdadera continuidad temporal. El segundo se circunscribía al período 1993-1995, el tercero a los años 1997-2000, luego 2003-2006, 2008-2011 y 2014-2016. Después de varios años sin aprobarse un nuevo plan, en 2022 se aprobó el Plan Estratégico para la Igualdad Efectiva de Mujeres y Hombres, para el periodo 2022-2025. Una falta de continuidad que se repite igualmente en las demás escalas administrativas, sean Planes de Igualdad de las comunidades autónomas, las diputaciones provinciales, o los ayuntamientos.

A medida que la institucionalización de la Igualdad avanzaba, el movimiento feminista iba consiguiendo más logros con la denominada unidad de acción, pero a cambio perdía fuerza combativa. La unidad de acción suponía no profundizar en las diferencias internas para lograr un mayor éxito social, aunque esas diferencias tensionaban todos los encuentros desde las II Jornadas Feministas Estatales celebradas en Granada en 1979. Diferencias nucleadas en torno al denominado feminismo de la igualdad y el de la diferencia o los enfrentamientos entre las feministas independientes y las de doble militancia (en el movimiento feminista y en un partido político). Las dos décadas siguientes son las de la fragmentación de las organizaciones feministas y su desmovilización, al tiempo que la Igualdad se asienta en la administración a través de los Planes de Igualdad de Oportunidades.

La Comisión Europea financió en 1994 y 1995 un proyecto denominado “La ciudad, la ciudadanía y el género” realizado por cinco organizaciones de Bélgica, Alemania, Francia, Grecia y Holanda que desembocó en la denominada Carta Europea de las Mujeres en la Ciudad, una declaración institucional de 12 puntos y 5 áreas prioritarias. Esta Carta plantea como objetivo crear una nueva filosofía en el planeamiento urbano eliminando los obstáculos que retrasan el derecho de las mujeres a la ciudad. Según

esta declaración, las mujeres son invisibles en todas las decisiones sobre la ciudad, la vivienda o el planeamiento urbano, que considera sólo núcleos familiares en los que el trabajo de la mujer se reduce al cuidado del hogar y de la familia y el empleo del hombre es el único sustento económico. En realidad, este estereotipo social sólo representa a una minoría y hace décadas que el modelo familiar del sistema patriarcal ha sido reemplazado por nuevos tipos de familias que el planeamiento urbano ni ha previsto ni ha tenido en cuenta, generando nuevas disfunciones y tensiones sociales. La planificación de la ciudad funcional, heredera de La Carta de Atenas de Le Corbusier, genera graves problemas y un incremento continuo de los costes sociales y económicos por la obligada movilidad diaria (Carta Europea de las Mujeres en la Ciudad, 1995).

La IV Conferencia Mundial sobre la Mujer, Beijing 1995, supuso un importante punto de inflexión al ser aprobado su Plan de Acción por 189 países. En la Conferencia de las Naciones Unidas Habitat II, celebrada en Estambul en 1996, se adoptó el compromiso de igualdad entre el hombre y la mujer (art. 46) tanto en el planeamiento como en las políticas o proyectos sobre todos los asentamientos humanos, teniendo en cuenta las necesidades de hombres y mujeres a través de estadísticas e indicadores específicos y fomentando la participación de las mujeres en los procesos de tomas de decisiones. Además, el Movimiento Feminista se reactivó en 2000 con el nacimiento de la Marcha Mundial de las Mujeres, una organización de carácter frentista que volvió a agrupar a las activistas defensoras de los derechos de las mujeres.

En 2002 el I Seminario Internacional sobre la Seguridad de las Mujeres de Quebec, ciudad donde se había realizado la primera Marcha en 1995, concluyó con una declaración institucional, que entre otras cuestiones, para vivir en unas ciudades en las que las mujeres se sintiesen más seguras, requería la inclusión en el planeamiento de la perspectiva de género, la oposición a los roles tradicionales, el fomento de la participación activa de la mujer en las tomas de decisiones y la financiación con presupuestos municipales de programas y planes de igualdad. En nuestro país, la Ley Orgánica de Medidas de Protección Integral contra la Violencia de Género se aprobó en diciembre de 2004.

La Carta por el Derecho de las Mujeres en la Ciudad, cuyos apartados se incluyeron en la Carta Mundial por el Derecho a la Ciudad aprobada y refrendada en varias cumbres mundiales en 2004 y 2005, establecía la necesidad de cumplir cuatro objetivos para lograr unas ciudades más equitativas: el acceso a la tenencia segura de la vivienda y a los servicios sociales; dotar a las ciudades de un transporte público seguro y adecuado a los requerimientos de movilidad de las mujeres; conseguir unas ciudades seguras para las mujeres; y promover transformaciones culturales que reviertan las

situaciones de inequidad social y de subordinación de género en todos los ámbitos de la vida.

Finalmente, la Carta Europea para la Igualdad de mujeres y hombres en la vida local, elaborada por el Consejo de Municipios y Regiones de Europa en 2006, habla de igualdad real y establece en sus 30 artículos los mecanismos para hacer efectivo este compromiso. El artículo 15 hace referencia a los cuidados y servicios sociales, el 16 al cuidado de menores, el 19 a la vivienda, el 21 a la seguridad, el 25 a la planificación urbana y el 26 a la movilidad y el transporte.

Desde finales de los años 1990 y principios de la primera década del siglo XXI se generalizó la Igualdad como materia docente y de investigación académica en las universidades españolas. Se financiaron proyectos de investigación, se crearon fundaciones y cátedras, se otorgaron premios, nacieron revistas y se impartieron cursos específicos y másters sobre igualdad. Estos masters institucionalizaban la creación de una nueva categoría profesional, Agente de Igualdad, que debía ser la persona encargada de diseñar y llevar a cabo las políticas de igualdad, tanto en el sector privado como en el sector público.

En el momento de máximo desarrollo normativo, académico e institucional de la lucha por la Igualdad en España, comenzaron a percibirse los efectos de la Gran Recesión mundial que redujo las convocatorias de ayudas, eliminó el tema de la Igualdad de la agenda política y cercenó multitud de proyectos por falta de financiación, pública y privada. En el momento actual, la unidad de acción parece haberse roto de manera insalvable y la doble militancia perjudica seriamente que se mantengan muchos de los logros alcanzados en las anteriores décadas de lucha.

### **3 EL MARCO LEGAL DE LA IGUALDAD EN ESPAÑA. LA INTRODUCCIÓN, POR LEY, DE LA PERSPECTIVA DE GÉNERO EN EL DISEÑO URBANO**

El verdadero momento de inflexión de las políticas públicas sobre Igualdad en España se produjo en 2007-2008, en relación a dos hechos fundamentales. Por un lado, la aprobación en marzo de 2007 de la Ley Orgánica para la Igualdad efectiva de mujeres y hombres, y por otro, la creación del Ministerio de Igualdad en abril de 2008 en el segundo gobierno formado por José Luis Rodríguez Zapatero, tras su reelección el 9 de marzo de ese año. Aunque esta delegación específica desapareció con los primeros recortes sociales en octubre de 2010, la Igualdad alcanzó en España el rango de Ministerio. Desde la Concejalía de la Mujer de Teresa Colón en Alcobendas de 1979 al Ministerio de Bibiana Aído en el Gobierno de España de 2008 “sólo” transcurrieron 29 años.

La Ley de Igualdad efectiva fue una nueva mirada a las legislaciones más avanzadas de Europa y el mayor intento realizado desde el gobierno del Estado por dejar atrás la Igualdad de Oportunidades (laborales) del pensamiento liberal, y legislar siguiendo el mainstreaming de género, para introducir acciones de igualdad en todas las políticas públicas (Bodelón, 2010).

En el Artículo 31 de esta Ley se establece la integración de la Igualdad en las políticas urbanas, de ordenación territorial y vivienda en estos términos: "...las políticas urbanas y de ordenación del territorio tomarán en consideración las necesidades de los distintos grupos sociales y de los diversos tipos de estructuras familiares y favorecerán el acceso en condiciones de igualdad a los distintos servicios e infraestructuras urbanas... Las Administraciones públicas tendrán en cuenta en el diseño de la ciudad, en las políticas urbanas, en la definición y ejecución del planeamiento urbanístico, la perspectiva de género, utilizando para ello, especialmente, mecanismos e instrumentos que fomenten y favorezcan la participación ciudadana y la transparencia (art. 31, LOIEMH, 2007).

La mayor parte de las comunidades autónomas aprobaron posteriormente sus propias leyes de igualdad (Tabla 1), si bien en algunos casos la normativa regional precedió a la estatal, como en el caso de las Leyes de Navarra (2002), País Valencià (2003), Castilla y León (2003), o Euskadi (2005). Las tres primeras siguen el modelo de Igualdad liberal, desde el planteamiento más escueto de la Ley foral, que en sólo dos artículos transpone la normativa europea, a la más elaborada de Castilla y León que en su artículo 4 establece que "serán competencias de las Diputaciones Provinciales y de los Ayuntamientos con más de 20.000 habitantes....Adoptar las medidas necesarias para el fomento de acciones positivas en favor de las mujeres de su ámbito territorial (y) aprobar y ejecutar en su respectivo ámbito, Planes de Igualdad de Oportunidades entre Mujeres y Hombres". La Ley Vasca sería, en cambio, un ejemplo de mainstreaming de género, que en su artículo 46, establece "Los poderes públicos vascos arbitrarán los medios necesarios para garantizar que sus políticas y programas en materia de medio ambiente, vivienda, urbanismo y transporte integren la perspectiva de género, considerando, entre otras, cuestiones relativas a la seguridad de las personas, a facilitar la realización del trabajo doméstico y de cuidado de las personas y la conciliación de la vida personal, familiar y laboral, así como a fomentar una mayor participación de las mujeres en el diseño y ejecución de las citadas políticas y programas" (art. 46, Ley 4/2005 para la Igualdad de Mujeres y Hombres).

Tabla 1. Leyes autonómicas de Igualdad y articulado relativo a planes y ciudad.

<i>Andalucía</i>	Ley 12/2007 para la promoción de la igualdad de género.	Artículo 50. Planeamiento urbanístico y vivienda.
<i>Aragón</i>	Anteproyecto de Ley de igualdad de oportunidades entre mujeres y hombres.	Artículo 50.- Planes de igualdad en la Adm. Pública. Artículo 75.- Planeamiento urbanístico y vivienda.
<i>Asturias</i>	Ley 2/2011 para la igualdad de mujeres y hombres y la erradicación de la violencia de género.	Artículo 21.–La integración del principio de igualdad entre mujeres y hombres en las políticas de bienestar social
<i>Baleares</i>	Ley 11/2016 de igualdad de mujeres y hombres.	Artículo 52. Organización de espacios, horarios y creación de servicios. Artículo 57. Políticas urbanas, de ordenación territorial, de medio ambiente y de vivienda.
<i>Canarias</i>	Ley 1/2010 de igualdad entre mujeres y hombres.	Artículo 41. Organización de espacios, horarios y creación de servicios. Artículo 57. Vivienda, urbanismo y planeamiento.
<i>Cantabria</i>	Anteproyecto de Ley para la igualdad efectiva entre mujeres y hombres.	Artículo 125. Igualdad en las políticas de vivienda, ordenación del territorio, urbanismo y transporte
<i>Castilla La Mancha</i>	Ley 12/2010 de igualdad entre mujeres y hombres.	Artículo 12. Plan estratégico para la igualdad de oportunidades
<i>Castilla y León</i>	Ley 1/2003 de igualdad de oportunidades entre mujeres y hombres	Artículo 4. Planes de Igualdad de Oportunidades entre Mujeres y Hombres
<i>Cataluña</i>	Ley 17/2015 de igualdad efectiva de mujeres y hombres.	Artículo 13. Planes de igualdad y actuación transversal Artículo 53. Planificación de las políticas de medio ambiente, urbanismo, vivienda y movilidad
<i>Euskadi</i>	Ley 4/2005 para la igualdad de mujeres y hombres	Artículo 15. Planes para la igualdad de mujeres y hombres. Artículo 46. Medio ambiente y vivienda.
<i>Extremadura</i>	LEY 8/2011 de igualdad entre mujeres y hombres y contra la violencia de género.	Artículo 8. Planes territoriales de ámbito local Artículo 57. Organización de espacios, horarios y creación de servicios. Artículo 67. Planeamiento urbanístico y vivienda.
<i>Galicia</i>	DECRETO legislativo 2/2015, de 12 de febrero, por el que se aprueba el texto refundido de las disposiciones legales en materia de igualdad.	Artículo 45. Promoción autonómica de planes municipales de igualdad Artículo 100. Los Planes de programación del tiempo de la ciudad
<i>Madrid</i>	Ley 2/2016 de identidad y expresión de género e igualdad social y no discriminación	
<i>Murcia</i>	Ley 7/2007, para la igualdad entre mujeres y hombres, y de protección contra la v. de género.	Artículo 15.- Planes municipales de igualdad de oportunidades entre mujeres y hombres.

<i>Navarra</i>	Ley Foral 33/2002 de fomento de la igualdad de oportunidades entre mujeres y hombres	
<i>Rioja</i>	Ley 3/2011 de prevención, protección y coordinación institucional en materia de violencia	
<i>Pais Valenciá</i>	Ley 9/2003 para la igualdad entre mujeres y hombres	Artículo 27. Plan Integral de la Familia y la Infancia.

Las Leyes autonómicas de igualdad posteriores a la Ley Orgánica utilizan distintas fórmulas para introducir la perspectiva de género en el planeamiento urbano. La Ley andaluza en su artículo 50 expone que los poderes públicos de Andalucía tendrán en cuenta la perspectiva de género en el diseño de las ciudades, en las políticas urbanas, y en la definición y ejecución de los planeamientos urbanísticos. Una frase, “tendrán en cuenta la perspectiva de género”, copiada de la Ley orgánica, que repiten las leyes canaria y extremeña, mientras que La Ley de Baleares utiliza la expresión “integren”, el anteproyecto cántabro “integrarán” y el anteproyecto aragonés “aplicarán el enfoque de género”. Por su parte, en las Leyes de Asturias, Castilla-La Mancha, Galicia, Madrid, Murcia y La Rioja no hay ningún artículo relativo a la perspectiva de género en el planeamiento urbano, de hecho, ni Madrid ni La Rioja tienen Ley de igualdad entre mujeres y hombres. En el extremo contrario está la Ley catalana, la más avanzada de todas, que en su artículo 53 expone que “las políticas de medio ambiente, urbanismo, vivienda y movilidad deben a) Incorporar la perspectiva de género en todas las fases del diseño, planificación, ejecución y evaluación urbanísticos, para situar en igualdad de condiciones, en el diseño y configuración de los espacios urbanos, las necesidades y prioridades derivadas del trabajo de mercado y del doméstico y de cuidado de personas, así como para colaborar a eliminar las desigualdades existentes” (art. 53, Ley 17/2015 de igualdad efectiva de mujeres y hombres).

Además de estas referencias a la incorporación de la perspectiva de género en el planeamiento, en otros artículos de estas leyes se hace referencia a los planes de usos del tiempo y la organización de espacios que faciliten la funcionalidad de la ciudad y la conciliación de sus habitantes, propicien la proximidad de las dotaciones y los servicios, y minimicen los desplazamientos y los tiempos de acceso, como ocurre en la Ley de Baleares, Canarias, Cantabria, Extremadura o Galicia. La Ley Catalana, nuevamente, presenta una redacción mucho más elaborada y detallista, como queda reflejado en los epígrafes d y e del artículo 53: “. d) La aplicación de una política urbanística que tienda a crear ciudades compactas, mixtas y cercanas, que mantengan su relación con la naturaleza, donde se reduzca la presencia y prioridad del vehículo privado y se introduzcan medidas para mejorar y densificar las áreas monofuncionales residenciales.

En este sentido, la política urbanística debe prever la descentralización de servicios, a fin de que la construcción de infraestructuras y la ordenación del suelo den respuesta a las necesidades de conciliación de la vida personal, familiar y laboral, disminuyendo los tiempos de desplazamiento y garantizando la accesibilidad de los servicios en igualdad de oportunidades. e) Equipamientos públicos con instalaciones que faciliten los usos y cubran las necesidades de todo el mundo. En este sentido, y en la medida de lo posible, deben habilitarse zonas para la atención de niños, especialmente para disponer de cambiadores de pañales, accesibles tanto para hombres como para mujeres” (art. 53, Ley 17/2015 de igualdad efectiva de mujeres y hombres).

Finalmente, las diferentes Leyes establecen tres tipos de planes de igualdad en la administración pública, además de los planes de igualdad en las empresas: los planes de igualdad de oportunidades entre mujeres y hombres relativos fundamentalmente a la igualdad de condiciones laborales, los Planes Municipales o Territoriales de Igualdad, donde la igualdad se trata de integrar en todas las políticas del municipio o provincia, y los Planes Estratégicos realizados por las comunidades autónomas, en los que se marcan las principales líneas de actuación de las políticas regionales.

Un aspecto fundamental en el desarrollo normativo de estas leyes es el referido a la cualificación profesional de las personas que deben encargarse de desarrollar estos planes y medidas. En la Ley Orgánica se habla en el artículo 77 de las Unidades de Igualdad que debían establecerse en todos los Ministerios, pero no se especifica nada sobre que tipo de trabajadores debían formar parte de estas unidades, ni que tipo de formación debían tener. Algo que sin embargo ya figuraba en la Ley Navarra de 2002, concretamente en el apartado m de su artículo 1: “Se promoverá la formación de agentes y promotores y promotoras para la igualdad de oportunidades, a fin de desarrollar acciones positivas en materia de empleo, educación, cultura, etc.”. La primera categorización en Europa de la profesión de Agente de Igualdad se sitúa en 1984, con el impulso al desarrollo de estas políticas ejercido por el Consejo de la Comunidad Europea y en España desde 1994 el INEM recoge esta figura en su Clasificación Profesional de Ocupaciones. En un Estudio realizado por la Federación estatal de Asociaciones Profesionales de Agentes de Igualdad de Oportunidades (FEPAIO, 2010) se ponía de manifiesto la gran disparidad de situaciones y criterios para cualificar esta ocupación y su indefinición. Por el contrario, la ocupación promotor/a de Igualdad, grado de Formación Profesional, si tiene certificado oficial válido para toda España. Esta falta de interés por delimitar las competencias profesionales lleva a situaciones cuando menos paradójicas, como en la Ley de Igualdad de Galicia, en la que el artículo 45 expone textualmente: “La consellería competente en

materia de trabajo establecerá reglamentariamente líneas de ayuda para la contratación de personal especializado en el ámbito laboral destinado a asesorar en la elaboración de planes municipales de igualdad.”

En resumen, el marco normativo sobre igualdad se enriquece en gran medida durante los últimos años. Algunas leyes de las señaladas muestran un mayor compromiso con la igualdad que otras, pero ninguna de ellas supone un cambio real si no se implementan adecuadamente. Es lo que pretendía el gobierno de Zapatero al crear el Ministerio de Igualdad, como instrumento para desarrollar la Ley de 2007. De poco sirve una Ley avanzada si la Igualdad, como delegación competencial va perdiendo importancia y presencia en los presupuestos generales. No tiene sentido que la Ley de Murcia, por ejemplo, establezca en su disposición adicional que en el plazo de un año las entidades locales elaborarán un plan municipal de igualdad, si esta disposición no va acompañada de una asignación económica para sufragar la redacción de este planeamiento y, sobre todo, la gestión posterior de las actuaciones diseñadas. Lo mismo ocurre con los Planes Estratégicos y los Observatorios de las comunidades autónomas, sin personal ni financiación propia para desarrollar sus actuaciones.

Frente a esta situación general de parálisis, algunas ciudades españolas han tratado de llevar a cabo medidas que introduzcan la perspectiva de género en sus ámbitos urbanos desde distintos enfoques. Algunas de estas actuaciones se incluyen en las líneas programadas en los Planes de Igualdad vigentes, otras son experiencias distintas que rompen el marco normativo del plan e introducen la igualdad a través de otras formulaciones.

#### **4 ESTUDIOS DE CASOS. DIEZ CIUDADES QUE TRATAN DE SER MÁS IGUALITARIAS**

A continuación, se señalan diez ejemplos de medidas llevadas a cabo en distintas ciudades, que tienen como objetivo general introducir la perspectiva de género en el diseño urbano. Se han seleccionado ciudades de distintas regiones que han realizado propuestas muy diferenciadas, con el ánimo de ofrecer una panorámica diversa de las acciones que diferentes colectivos y ayuntamientos han desarrollado en los últimos años. Además de las mencionadas existen otras actuaciones que podrían figurar en este catálogo de buenas prácticas, pero el objetivo de este capítulo es realizar un análisis exploratorio, una selección de casos con los que componer una muestra significativa de lo que ocurre en España, sin el ánimo de exponer todas las actuaciones con perspectiva de género llevadas a cabo durante los últimos años en este país.

## 4.1 BARCELONA

A pesar de que los planes de organización del tiempo en la ciudad figuran en la ley Orgánica y en bastantes de las leyes autonómicas, son muy pocas las experiencias concretas de este tipo de planes. En Barcelona, durante el mandato del alcalde socialista Jordi Hereu (2007-2011), se creó la concejalía de nuevos usos sociales del tiempo, regida por Inma Moraleda, que desarrolló una intensa labor con diferentes propuestas, entre otras: un programa unificado de las actividades extraescolares y de educación en el tiempo de ocio, la organización de actividades en el patio de los colegios los fines de semana para toda la familia, la apertura de los patios de los centros educativos para complementar la oferta de equipamientos y un proyecto piloto en el barrio de La Marina que pretendía mejorar la conciliación del tiempo de vida personal y a la vez la calidad urbana incidiendo en la movilidad diaria a través de los horarios escolares, comerciales, administrativos y de las actividades recreativas y culturales.

Años más tarde, en 2015, se proclamó alcaldesa Ada Colau, siendo la primera mujer alcaldesa de la ciudad. Bajo su mandato se realizaron nuevas actuaciones en materia de igualdad siendo una de las más importantes el denominado Plan de las supermanzanas, que consistió en eliminar la circulación de vehículos de motor en varias calles para recuperar ese espacio público como lugar de reunión y esparcimiento. En 2023 se han llevado a cabo la transformación de 14 supermanzanas.

Imágenes 1 y 2. Fotografías de las Supermanzanas de Hostafrancs y Sant Antoni.



Fuente: [www.ajuntament.barcelona.cat](http://www.ajuntament.barcelona.cat)

## 4.2 A CORUÑA

En julio de 2008 la concejala de urbanismo de A Coruña, también del PSOE, Mar Barcón, anunció que el Plan Especial de Reforma Interior del Barrio de Eirís de Abaixo lo iban a realizar un grupo de técnicas de su concejalía, un equipo formado

exclusivamente por mujeres, con el objetivo de introducir la perspectiva de género en el diseño de este barrio de la periferia urbana coruñesa. El anuncio se realizó coincidiendo con la presentación de las jornadas sobre Urbanismo y Género que se celebraron en noviembre de 2008. En su blog personal, la concejala dejaba esta reflexión. “Es tiempo de recuperar la diferencia, es el momento de trasladar a las herramientas de transformación de las comunidades – y el urbanismo es la más potente de ellas- el discurso de la mujer vista por la mujer, de la ciudad percibida por la ciudadana, de los espacios necesitados y sentidos por el femenino y visto en femenino” (Mar Barcón, blog personal). Desde 2019 también en A Coruña gobierna una mujer como alcaldesa, Inés Rey.

### 4.3 CÓRDOBA

Dentro de las secciones del Colegio de Arquitectos de Córdoba se encuentra desde 2003 el Aula Eileen Gray, formada por nueve arquitectas, que desde esa fecha han desarrollado diversas actuaciones urbanísticas con perspectiva de género. En esta comunicación destacamos el proyecto llevado a cabo en Montoro, una pequeña ciudad de apenas 10.000 habitantes a orillas del Guadalquivir y situada entre Sierra Morena y la campiña. Las integrantes del Aula Eileen Gray, a través de un convenio suscrito con la Diputación de Córdoba, se encargaron de informar a los colectivos de mujeres de este municipio para fomentar su participación activa en el planeamiento. Este proceso se llevó a cabo a través de diversos talleres en los que las integrantes de este colectivo primero formaron y después informaron a las mujeres sobre cómo podían incorporar sus necesidades y propuestas al planeamiento general. El documento final, que se trasladó al equipo redactor antes de la fase de aprobación inicial, presentaba las soluciones planteadas por las mujeres de Montoro a los problemas que ellas percibían agrupadas en dos bloques: servicios y equipamientos, y espacios públicos. En el primer grupo se demandaron dos guarderías más y un centro de día, próximos y accesibles a pie y en transporte público. Las propuestas solicitaban una mejor distribución de los equipamientos y servicios, evitando que determinados barrios se convirtiesen en zonas monofuncionales. En cuanto a los espacios públicos, las mujeres de Montoro solicitaban mejoras en las calles para fomentar el tránsito peatonal, con aceras más anchas para poder pasear con los carritos de los bebés. También se pidieron más parques dotados de juegos infantiles, sobre todo en el casco histórico (Aroca, et.al., 2011).

Imagen 3. Taller de participación realizado por el Aula Eileen Gray del Colegio de Arquitectos de Córdoba.



Fuente: Aroca et al, 2011.

#### 4.4 PAMPLONA

La capital navarra es una de las ciudades de España que más tiempo lleva trabajando en fomentar una movilidad más sostenible entre todos sus habitantes. El plan de transporte comarcal se aprobó en 1999, el pacto local de movilidad sostenible en 2005, el plan de movilidad urbana sostenible de la comarca en 2007 y el nuevo Plan de movilidad municipal en 2017. El primero de ellos mereció el galardón de mejor práctica en el concurso de Dubai (2000) en la categoría de igualdad y equidad de género, por la metodología empleada en el proceso de participación activa de las mujeres y por la implantación en el plan de gran número de sus propuestas.

En este proceso participaron un grupo de profesoras de sociología de la Universidad Pública de Navarra, dirigidas por Mercedes Pardo, y el colectivo de mujeres urbanistas de Madrid, en este proyecto liderada por la geógrafa Marta Román. El fomento de la participación activa de la mujer en el diseño de la ciudad y en los diferentes proyectos urbanísticos era un objetivo incluido en el Plan de Igualdad de Pamplona. En este caso se realizó primero un estudio sobre las necesidades de movilidad de las mujeres, después un documento con las propuestas y finalmente un catálogo de indicadores de igualdad y sostenibilidad para evaluar la eficacia del plan. Entre las propuestas señaladas se introducía la necesidad de nuevas líneas de autobuses y paradas, mejoras en los mismos para facilitar el acceso con carritos de la compra o de bebé, líneas rápidas y líneas nocturnas para determinados colectivos, etc.

#### 4.5 FUENLABRADA

En este caso, la actuación que seleccionamos es de visibilización de la mujer en la ciudad. El ayuntamiento de Fuenlabrada decidió en 2006, dentro del Plan de Igualdad

Municipal, sensibilizar a la población sobre el oscurecimiento del papel de la mujer en el día a día de la ciudad y en el sesgo sexista de la señalización viaria con el programa “Señales no sexistas”, sustituyendo la silueta masculina por una silueta femenina en señales de pasos de cebra y semáforos, en algunos cruces de las vías principales de la ciudad. Esta campaña de sensibilización se había realizado antes en ciudades como Dresde o Viena y en España, Fuenlabrada fue la primera en realizar esta acción con carácter permanente. Otras ciudades como Lugo, Jaén, Coruña, Valencia, Vitoria o Sagunto también han copiado la iniciativa de Fuenlabrada llevando a cabo campañas similares.

Imágenes 4 y 5. Señales no sexistas en Fuenlabrada.



Fuente: [www.ayto-fuenlabrada.es](http://www.ayto-fuenlabrada.es)

#### 4.6 GRANOLLERS

En Cataluña se aprobó la conocida como Ley de Barrios en 2004, que trataba de promover la rehabilitación integral de barrios degradados a través del compromiso de financiación del 50% del proyecto por parte de la Generalitat, mientras que el otro 50% lo consignaba el ayuntamiento solicitante. La novedad es que entre los ocho campos de actuación susceptibles de financiación que fijaba la ley el 6º era “equidad de género en el uso del espacio urbano y los equipamientos”, junto a espacios públicos, rehabilitación, equipamientos, nuevas tecnologías, sostenibilidad, programas sociales y accesibilidad. Uno de los barrios rehabilitados fue el de Congost en la ciudad de Granollers y dentro de las actuaciones financiadas en el apartado de equidad de género, el colectivo punt 6 (llamado así precisamente por el punto 6 de la citada ley) realizó diversas propuestas para fomentar la participación activa de las mujeres en el diseño de la rehabilitación urbanística del barrio.

Imagen 6. Reunión promovida por el colectivo Punto6 en el barrio de Congost (Granollers) "Las mujeres hacemos piña".



Fuente: [www.punt6.org](http://www.punt6.org)

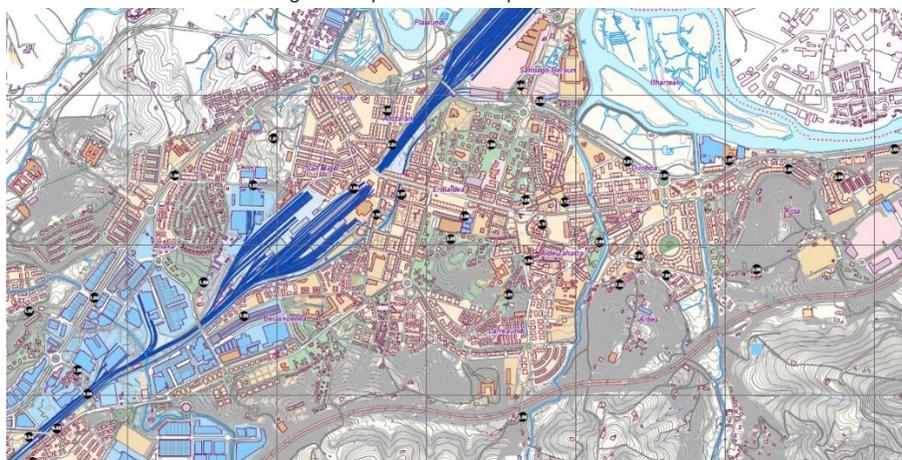
Este grupo de mujeres urbanistas desarrolló sus propuestas desde la perspectiva del feminismo interseccional, en el que se analizan las diferentes identidades solapadas o intersectadas y sus respectivos sistemas de dominación, opresión o discriminación. De esta forma, el sexismo, la aporofobia, el capacitismo, la homofobia, la transfobia o la xenofobia no actúan de forma independiente, sino que todas las formas de exclusión están interrelacionadas, creando un sistema de opresión que refleja la intersección de múltiples formas de discriminación. En los talleres celebrados en el barrio del Congost, había mujeres de origen magrebí, latinoamericanas, del África subsahariana, de otras regiones españolas y de la localidad. El trabajo se basaba en reivindicar la experiencia de las mujeres como expertas de la vida cotidiana en el entorno urbano, para incluir este conocimiento empírico en los procesos de toma de decisión y en el diseño y planificación de las ciudades. Las conclusiones de los talleres se introdujeron en la propuesta final de intervención sobre el barrio agrupadas en cuatro bloques: espacio público, movilidad, equipamientos y seguridad. Además de la intervención en este barrio, el colectivo punt 6 ha participado en otros proyectos urbanísticos, desarrollando metodologías para realizar auditorías de género en el ámbito del urbanismo (Muxí y Ciocoletto, 2011).

#### 4.7 IRÚN

En Euskadi comenzaron a realizarse “mapas de la ciudad prohibida” en 1997 en la ciudad de Donosti con Plazandreak y el grupo “Las Mujeres y la Ciudad” dirigidos por Cristina Alberdi, exministra de asuntos sociales y portavoz de la Unión Europea en la Conferencia de las Mujeres de Pekín en 1995. Esta labor fue continuada en la década

siguiente por Hiria Colectiboa, que comenzó en 2002 y generó este tipo de herramienta metodológico en diferentes ciudades vascas: Ermua, Basauri, Eibar, Ondarroa, Hernani o Irún, con subvenciones de Emakunde, el Instituto Vasco de la Mujer. Los mapas de la ciudad prohibida son proyectos colectivos en los que se cartografían los puntos negros de inseguridad que sienten las mujeres al caminar por su entorno urbano y que limitan su utilización del espacio público. La elaboración de estos mapas debe tener tiempo después una “devolución” de la administración correspondiente con mejoras en esos puntos para reducir las sensaciones de miedo, combatiendo la “pócima de la inseguridad”, en palabras de Marta Román, un compuesto de la sociedad patriarcal eficaz para mantener a las mujeres en su casa (Hiria Colectiboa, 2010).

Imagen 7. Mapa de la ciudad prohibida de Irún.



Fuente: [www.irun.org](http://www.irun.org)

## 4.8 GIJÓN

La ciudad asturiana se convirtió desde hace años en referente en la lucha contra la violencia de género, gracias especialmente al trabajo de la alcaldesa Paz Fernández Felgueroso, quien ya en 2001 promovió la celebración del I Congreso Nacional de violencia sobre la mujer en esta ciudad. Un año antes se había aprobado el III Plan para la Igualdad de Oportunidades entre Mujeres y Hombres (2001-2005), elaborado con la participación de más de 600 mujeres que redactaron la Carta de las Mujeres de Gijón, en la que la lucha contra la violencia machista era uno de los principales objetivos. En 2007 se inauguró la Casa Malva, el primer centro de atención integral a las mujeres víctimas de la violencia de género, construido con la intención manifiesta de hacerlo visible a los ojos del resto de la ciudad, con el ánimo de ser un motivo continuo de

reflexión y concienciación. Cabe destacar que, en el resto de las ciudades españolas, las residencias donde se acoge a las mujeres víctimas de maltrato se mantienen en secreto, para evitar que los maltratadores puedan localizarlas, pero revictimizando a las mujeres que deben permanecer escondidas.

Imagen 8. La Casa Malva en Gijón.



Fuente: [www.iam.asturias.es](http://www.iam.asturias.es)

#### 4.9 ALBACETE

En la ciudad de Albacete, el equipo redactor del Plan de Ordenación Municipal encargó al grupo de investigación de la Universidad de Alicante dirigido por la arquitecta María Elia Gutiérrez Moro, la incorporación de la perspectiva de género al nuevo planeamiento, siguiendo el artículo 31 de la Ley Orgánica de Igualdad de 2007. Este objetivo se consiguió a través del proyecto Albaceteplural, en el que también colaboró la Junta de Comunidades de Castilla La Mancha a través de la Dirección General de Planificación, dirigida por Bárbara Pons Giner. El resultado de todo el proceso de participación a través de la página web del proyecto y de los talleres realizados en los barrios se presentó en diciembre de 2009 y fue incluido en la revisión del Plan de Ordenamiento Municipal. Las conclusiones incluyeron propuestas sobre dotaciones y equipamientos, espacio público y zonas verdes, viviendas y hábitat, movilidad, y por último seguridad (Gutiérrez, 2012).

## 4.10 VALENCIA

Finalmente, en Valencia el ayuntamiento decidió abordar la revisión del Plan General de Ordenación Urbana incorporando la perspectiva de género a través del proyecto “Jane’s Walk”. Detrás de esta iniciativa se encuentra la Asociación Sostre, una consultora que ofrece servicios en arquitectura, territorio y ciudad inclusiva. La herramienta que emplea esta agrupación para llevar a cabo los proyectos que estuvo realizando en Valencia entre 2016 y 2019 es el paseo, una herramienta técnica para el análisis de género en la ciudad, que permite de una manera lúdica y participativa valorar los conflictos y oportunidades de cambio para mejorar el entorno cotidiano. El “Paseo de Jane” se originó en 2007 en Toronto, en memoria de Jane Jacobs, la gran pensadora norteamericana autora de la obra Muerte y vida de las grandes ciudades (1961), que se considera un antecedente en la introducción de la perspectiva de género en la ciudad.

Imagen 9. Cartel anunciador de un “paseo de Jane” en Valencia en 2018.



Fuente: [www.patraix.org](http://www.patraix.org)

## 5 DECÁLOGO Y CONCLUSIONES

Quince años después de aprobarse la Ley Orgánica de Igualdad en España poco se ha avanzado en el objetivo de conseguir la ciudad igualitaria. La crisis ha frenado muchos de los procesos incipientes de la primera década del siglo XXI, y si bien algunos parecen retomarse en la actualidad otros ya se han borrado de la memoria colectiva.

Las actuaciones realizadas con perspectiva de género en las ciudades españolas han generado debate, han despertado conciencias y en algunos casos han contribuido a reorientar la mirada colectiva. La igualdad efectiva debe ser un proceso

asentado en la educación de los hogares, la formación reglada en todos los niveles y el discurso político generalizado de todas las organizaciones sociales. Sólo así acabarán los estereotipos y prejuicios de género.

Hasta que eso ocurra, debemos preparar a nuestras ciudades para que se conviertan en el escenario adecuado para el cambio. No basta con actuaciones puntuales, diseñadas con muy buena intención, que una vez transcurrido el periodo de desarrollo o tras un cambio en el gobierno municipal desaparecen de la memoria colectiva. Debemos trazar un plan a largo plazo, bien estructurado y jerarquizado para que no permitamos ningún paso atrás.

En este contexto se presenta el siguiente decálogo, que se plantea como una hoja de ruta para lograr ciudades donde la perspectiva de género forme parte de la vida cotidiana, del planeamiento y de un futuro esperanzador para todos sus habitantes.

- 1. Institucionalización** de la igualdad en la Administración, la Agenda Urbana y las empresas locales. Debemos crear Unidades de Igualdad, Servicios de Igualdad, Áreas de Igualdad, que cuenten con personal formado y financiación suficiente para llevar a cabo sus objetivos en el ámbito en el que se circunscriban.
- 2. Concienciación** de las discriminaciones. La sociedad en su conjunto debe ser consciente de que la igualdad no existe, de que la ciudad es hostil para la mujer y que esa situación debe cambiar con el trabajo de todos. La herramienta de los Paseos de Jan Jacobs es una herramienta adecuada para generar este cambio en la mentalidad popular.
- 3. Visibilización** de la mujer. Señales de tráfico, nombres de calles, parques y edificios públicos, lenguaje urbano. Se debe promover la visibilización del sexo infrarrepresentado en la ciudad.
- 4. Sororidad.** Fomento del asociacionismo en femenino en la ciudad para cualquier tema. Las mujeres deben sentirse apoyadas por otras mujeres para afrontar cualquier situación de la vida cotidiana en relación al trabajo, los cuidados, el ocio, o la salud.
- 5. Participación.** Se debe promover activamente la participación de estas asociaciones en la gestión de la vida cotidiana por parte de las instituciones públicas y en la planificación urbanística.
- 6. Empoderamiento.** Las opiniones de las asociaciones de mujeres mediante procesos de participación pública se tienen en cuenta y comienzan a transformar la ciudad.

7. **Género en la planificación técnica.** Discriminación positiva de técnicas y arquitectas que piensen la ciudad en femenino. Lucha contra el zoning y el racionalismo de Le Corbusier.
8. **Género en el uso cotidiano de la ciudad.** Se debe emplear la perspectiva de género en el diseño de calles, aparcamientos, equipamientos, servicios, horarios, infraestructuras.
9. **Género en la movilidad urbana.** La planificación del transporte público, la red de autobuses, metros, la accesibilidad de los barrios y áreas, la revisión de las prioridades en las calzadas, debe realizarse con perspectiva de género.
10. **Género en el gobierno y la gobernanza.** Promover el acceso al poder de las mujeres en todos los puestos de representación política, social y empresarial.

En Europa existen ejemplos de propuestas que buscan introducir la perspectiva de género en el diseño de la ciudad (Sánchez y Roberts, 2013). En España los ejemplos son más aislados y discontinuos. Faltan recursos económicos y personal especializado y sensibilizado en la Administración. Los proyectos analizados son ejemplos de buenas prácticas, unas propuestas metodológicas para hacer nuestras ciudades más habitables, seguras y cercanas, para mejorar la calidad de vida de sus habitantes. La ciudad inclusiva, la ciudad de todos y todas debe recuperarse como objetivo político en momentos de crisis como el actual.

Los Planes de Igualdad Municipales deben ser el documento que guíe las políticas y los programas concretos. Introducir la perspectiva de género no es más que tener en cuenta las necesidades de todas las personas que forman la ciudad, sin excluir a nadie. La Administración debe dar el paso que hace tiempo intenta dar la sociedad civil hacia un futuro más justo y equitativo. El camino que debemos seguir ya está iniciado.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aroca Pavón, P et al. (2011). *Urbanismo en clave de igualdad: el escenario deseado*. Córdoba, Diputación de Córdoba.

Beechey, V. (1977). Some Notes on Female Wage Labour in Capitalist Production. *Capital & Class*, 1(3), 45–66. <https://doi.org/10.1177/030981687700300103>.

Bodelón, E. (2010). Las leyes de igualdad de género en España y Europa: ¿hacia una nueva ciudadanía?, *Anuario de filosofía del derecho*, nº 26, 85-106.

Bondi, L. y Damaris, R. (2010). Constructing gender, constructing the urban: A review of Anglo-American feminist urban geography, *Gender, Place & Culture*. Vol. 10, nº 3, 229-245.

Ciocoletto, A. (2014). *Urbanismo para la vida cotidiana: herramientas de análisis y evaluación urbana a escala de barrio desde la perspectiva de género*. Tesis Doctoral. UPC.

- Comisión Europea (1995). *La Carta Europea de la Mujer en la Ciudad*. Comisión Europea.
- Condon, S. Lieber, M. y Maillochon, F. (2007). Feeling Unsafe in Public Places: Understanding Women's Fears, *Revue Française de Sociologie*, 5, Vol. 48, 101-128.
- Falu, Ana M. (2014). El derecho de las mujeres a la ciudad: espacios públicos sin discriminaciones y violencias, *Vivienda y Ciudad*; 1; 12-2014; 10-28.
- FEPAlO (2010). *Estudio de la situación actual de la figura de agente de igualdad de oportunidades de mujeres y hombres en España*. Madrid, Ministerio de Igualdad.
- Guasch, C. M. (1998). La movilidad de las mujeres en la ciudad. Un análisis desde la Ecología Urbana. *Ecología Política*, 123-130.
- Gutiérrez Moro, M.E. (Dir.) (2012). *Albaceteplural*. Albacete. Ayuntamiento de Albacete.
- Hayford, Alison. (1974). The geography of women: an historical introduction. *Antipode*, 6: 1-19.
- Hiria Colectivoa (2010). *Manual de análisis urbano*. Vitoria, Gobierno Vasco.
- Jacobs, J. (1961). *Muerte y vida de las grandes ciudades*. Madrid, Capitan Swing Libros S.L.
- Jarvis, H., Cloke, J., & Kantor, P. (2009). *Cities and gender*. Routledge.
- Kihato, C. (2013). *Migrant women of Johannesburg: Everyday life in an in-between city*. Springer.
- Miller, J. (2008). *Getting played: African American girls, urban inequality, and gendered violence*. NYU Press.
- Monqid, S. (2012). Violence against women in public spaces: the case of Morocco, *Egypte monde arabe*, 9, 105-117.
- Muxi Martínez, Z. y Ciocchetto, A. (2011). La Ley de Barrios en Cataluña: La perspectiva de género como herramienta de planificación. *Feminismo/s*, 17, 131-153.
- Ortiz i Guitart, A. (2007). Hacia una ciudad no sexista: Algunas reflexiones a partir de la geografía humana feminista para la planeación del espacio urbano. *Territorios*, (16), 11-28.
- Pain, R.H. (1997). Social Geographies of Women's Fear of Crime, *Transactions of the Institute of British Geographers*, Vol. 22, nº. 2, 231-244.
- Rahder, B., & Altília, C. (2004). Where is Feminism in Planning Going? Appropriation or Transformation? *Planning Theory*, 3(2), 107-116. <https://doi.org/10.1177/1473095204044777>
- Ramos, M.D. (2000). Identidad de género, feminismo y movimientos sociales en España, *Historia Contemporánea*, 21, 523-552.
- Rose, H. (1978). In practice supported, in theory denied: an account of an invisible urban movement. *International Journal of Urban and Regional Research*, 2: 521-537. <https://doi.org/10.1111/j.1468-2427.1978.tb00765.x>
- Sánchez Madariaga, I. (2004). *Urbanismo con perspectiva de género*. Unidad de igualdad y género. Junta de Andalucía.

Sánchez de Madariaga, I. y Roberts, M. (2013). *Fair Shared Cities. The impact of gender planning in Europe*. Farnham, Ashgate.

Secor, A. J. (2002). The veil and urban space in Istanbul: women's dress, mobility and Islamic knowledge. *Gender, Place and Culture: A Journal of Feminist Geography*, 9(1), 5-22. <https://doi.org/10.1080/09663690120115010>

Soto Villagrán, Paula. (2012). El miedo de las mujeres a la violencia en la ciudad de México: Una cuestión de justicia espacial. *Revista INVI*, 27(75), 145-169. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-83582012000200005>

Spain, D. (2014). Gender and urban space. *Annual Review of Sociology*, 40, 581-598. <https://doi.org/10.1146/annurev-soc-071913-043446>

Tobío, C. (2000). Estructura urbana, movilidad y género en la ciudad moderna. *Boletín CF+ S*, (13).

Vaiou, D., & Lykogianni, R. (2006). Women, neighbourhoods and everyday life. *Urban Studies*, 43(4), 731-743. <https://doi.org/10.1080/00420980600597434>

Valentine, G. (1989). "The geography of women's fear", *Area*, Vol. 21, nº 4, 385-390.

Verloo, M. M. T. (2001). *Another velvet revolution. Gender mainstreaming and the politics of implementation*. IWM Working Paper. Vienna.

# CAPÍTULO 12

## UN SENDERO CON TERRITORIALIDAD LOCAL EN LA QUEBRADA DE EL TALA, VALLE DE CATAMARCA<sup>1</sup>

Data de submissão: 24/01/2023

Data de aceite: 10/02/2023

### Ezequiel Fonseca

Lic. En Arqueología  
Universidad Nacional de Catamarca  
Facultad de Humanidades  
Dpto. Historia  
Catamarca-Argentina  
<https://orcid.org/0000-0003-1370-1650>

### Claudio Caraffini

Lic. En Arqueología  
Universidad Nacional de Catamarca  
Escuela de Arqueología  
Laboratorio de Arqueología Histórica  
Catamarca-Argentina  
<https://orcid.org/0000-0003-0501-7138>

### Cristian Melián

Lic. En Arqueología  
Dirección Provincial de Antropología  
Catamarca-Argentina  
<https://orcid.org/0000-0003-3739-5432>

**RESUMEN:** El presente trabajo pretende abordar el Sendero en Las Lomadas de La Aguada, Quebrada de El Tala (Provincia de Catamarca, Argentina), desde la perspectiva de la geografía crítica, como una expresión material de un paisaje construido a lo largo del tiempo con usos que dan cuenta de la

<sup>1</sup> Apoyo financiero Secretaría de Ciencia y Tecnología-UNCA; continuidad de nuestra investigaciones en la zona.

larga historia de resignificación de éste y de su importancia en la memoria de las generaciones que lo han transitado. Donde un conjunto de formas producidas por acciones sociales generaron transformaciones, tanto de los sujetos como del entorno. Este sendero dio lugar a formas específicas de organización del espacio y el tiempo en el valle de Catamarca. Fue una vía de acceso obligada entre las ocupaciones humanas para conectar el valle, la Quebrada de El Tala y las márgenes superiores del Cordón montañoso del Ambato durante casi dos milenios. El mismo se lo asocia a numerosos sitios prehispánicos del Período Formativo (200 al 1200 d. C.) hasta la conquista donde los españoles lo transitaron desde 1595, como vía de acceso a la sierra de Ambato.

**PALABRAS CLAVE:** Sendero. Transformación. Arqueología. Espacio. Historia.

### A TRAIL WITH LOCAL TERRITORIALITY IN QUEBRADA DE EL TALA, CATAMARCA VALLEY

**ABSTRACT:** This paper aims to approach the trail in Las Lomadas de La Aguada, Quebrada de El Tala (Province of Catamarca, Argentina), from the perspective of critical geography, as a material expression of a landscape built over time with uses that account for its long history of resignification and its importance in the memory of the generations that have passed through it. Where a set of forms produced by social actions generated transformations, both of the subjects and of the environment.

This trail gave rise to specific forms of organization of space and time in the valley of Catamarca. It was an obligatory access route between human occupations to connect the valley, the Quebrada de El Tala and the upper margins of the Ambato mountain range for almost two millennia. It is associated with numerous pre-Hispanic sites from the Formative Period (200 to 1200 A.D.) until the Spanish conquest in 1595, when it was used by the Spaniards as an access route to the Ambato mountain range.

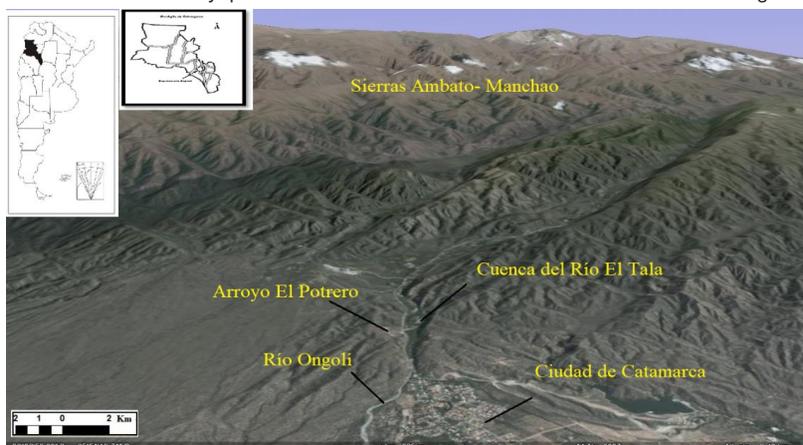
**KEYWORDS:** Trail. Transformation. Archaeology. Space. History.

## 1 EL SENDERO COMO PAISAJE SIGNIFICADO

Nuestra área de estudio cubre una superficie de 16 km<sup>2</sup> y se ubica en las primeras estribaciones de las Sierras de Ambato-Machao, ubicadas en el valle de Catamarca, Argentina. La singularidad que une a todo este espacio es su características temporal en relación un sendero en la Quebrada de El Tala, el cual en la historiografía local aparece mencionado como “Las Lomadas de La Aguada” por Maldones (1918). El sendero es hasta el día de hoy transitado por diversos puesteros durante sus actividades de pastoreo. Esta vía fue de importancia fundamental en las redes de tránsito en el pasado prehispánico y colonial, conectando a las zonas bajas del valle de Catamarca con las tierras de altura de las Sierras de Ambato-Machao a través de la Quebrada de El Tala y del Guaico. El mismo posee una longitud de 3.172 metros y está dispuesto de manera paralela al río El Tala sobre las lomadas sur.

Abordamos este espacio geográfico desde la perspectiva de la geografía crítica, tomando la mirada de Milton Santos (1985) para el cual el espacio es un sistema de objetos y sistemas de acciones en un conjunto indisoluble. Este autor plantea que los objetos naturales o artificiales son híbridos, ya que no tienen existencia real y valorativa sin las acciones humanas. De ese modo, cada lugar se define tanto por su existencia corpórea como por su existencia relacional va adquiriendo características locales.

Figura 1. Vista E-W del Valle y quebradas en las Serranías de Ambato-Manchao. Fuente: Google Earth®.



En este sentido, nuestro objetivo es trazar un recorrido por la espacialidad social que generó este sendero, es decir, describir un espacio donde los humanos vivieron en comunidad, desplegaron sus acciones y fueron afectados por la colonización. En suma, un territorio que se presenta como un espacio dinamizado por el tiempo, por la historia y que carga así la huella de la modalidad con que las formaciones sociales han ido realizando esas formas espaciales, únicas e irrepetibles.

## 2 METODOLOGÍA

Para abordar las diversas formas de usos que tuvo el sendero a lo largo del tiempo utilizamos una metodología de la Arqueología Histórica, implicando un acercamiento multidisciplinar que combinó técnicas de la arqueología, la geografía y la historia.

Las metodologías desarrolladas desde la arqueología y la geografía toman las propuestas de Criado Boado (1998 y 1999) y Anschuetz et al. (2001) relativa a los paisajes, consistente en deconstruir el paisaje en sus elementos formales, de modo que se puedan observar los patrones básicos de racionalidad que le dieron origen. Los elementos formales del paisaje se abordaron a través del análisis fisiográfico o morfológico. Este tipo de análisis se realizó en dos niveles arqueológicos. Primero, por medio de una sectorización arbitraria utilizando los niveles altitudinales en búsqueda de las locaciones efectivas de la cultura material. Segundo, comprendió el espacio físico construido (arquitectura) en relación al paisaje y ambiente circundante; donde la evidencia arqueológica nos permite aproximarnos un análisis diacrónico (Criado Boado, 1998).

A su vez, implementamos un modelo de prospecciones pedestres dirigidas mediante transectas destinadas a la identificación y registro de la distribución espacial de manifestaciones arqueológicas (Chapa Brunet et al., 2003), de acuerdo a una metodología sistemática que conjugó sencillez y economía de medios en el diseño, de hecho permitió la ejecución con eficacia y representatividad en los resultados volcados en QGIS 3.2, software libre elegido para el análisis de las evidencias registradas en el terreno. Luego se realizó el modelo digital de elevaciones (MDE) en la cual se distinguieron los puntos por tipologías de sitios y construir unidades de análisis espacial para las distribuciones de las estructuras y el sendero, caracterizando el paisaje (Melián et al., 2019).

Por otro lado, la metodología histórica complementó nuestra tarea mediante la correlación entre registro arqueológico y procesos sociales, particularmente los vinculados a la colonización en nuestra área de estudio. La documentación histórica, la heurística y el análisis crítico aportaron la convergencia entre los acontecimientos y huellas en el terreno, vinculado a procesos socio-históricos.

### 3 EL SENDERO COMO ENCLAVE

Las Lomadas de La Aguada, según Estanislao Maldones (1918), es la primera parte de la Quebrada de El Tala, abarcando el sector delimitado por el arroyo El Potrero de los Lascanos y el río de El Tala. Desde la confluencia de estos cursos de agua se inicia la antigua quebrada del Cigalí, llegando sus límites hasta donde el río El Tala hace una curva, por las condiciones geológicas de la zona, y en ese lugar se ubica la Estancia del Tala perteneciente a los padres Franciscanos. Por su parte, el arroyo El Potrero de los Lascanos, en la quebrada del Guaico, se define al oeste por la vertiente oriental de la Sierra de Ambato y al este por la vertiente occidental de la Sierra de Los Ángeles. Sus aguas provienen desde las cumbres del Cerro Durazno. El río desemboca finalmente en el Río El Tala, donde antiguamente se denominaba la entrada a la Quebrada de El Tala, de Choya o su nombre original Cigalí.

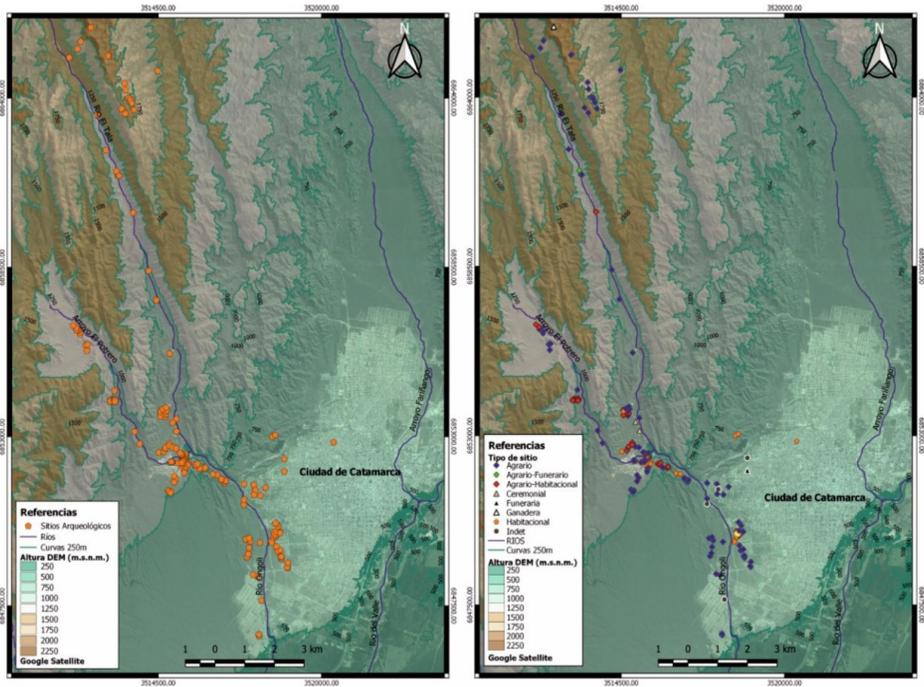
#### 3.1 LOS PRIMEROS HABITANTES EN LA QUEBRADA DE EL TALA

Las sociedades agropastoriles del valle de Catamarca y de la Quebrada de El Tala en particular, corresponden al Período Formativo (200-1200 d. C.). Utilizamos el concepto “formativo” en un sentido amplio (Olivera, 2001), como definición de una sociedad y no como rótulo identificador evolutivo, aunque en el marco de un proceso de transformación de los modelos sociales.

Las dataciones radiocarbónicas en nuestra área de estudio rondan entre ca.1800-800 AP: donde los últimos fechados realizados para los sitios Ojo de Agua (1032 ± 60 Años cal AD), ubicado en fondo de valle y para Pueblo Perdido, sector III, (641±50 años cal AD) emplazado en las lomadas de la Aguada. El registro arqueológico para nuestra zona, nos permite identificar conjuntos de sitios similares entre sí, coincidente con comunidades aldeanas que comparten características recurrentes como un explícito patrón arquitectónico y una ergología asociada típica, los cuales se extienden en un espacio geográfico a lo largo de un rango temporal específico (Fonseca et al., 2018). Los materiales cerámicos registrados representan diversos procesos culturales como Cóndor Huasi, Candelaria, Ciénaga y Aguada en sus manifestaciones Portezuelo y Huillapima fondo crema (Fonseca et al., 2014).

En base a nuestros relevamientos pedestres se localizaron un total de 180 sitios, manifestando una distribución aislada o patrón disperso. La clasificación por su posible función es: agrario; agrario-funerario; agrario-habitacional; ceremonial; ganadero; habitacional (Ver Figura 2).

Figura 2. En las imágenes MDE se muestran las distribuciones de los sitios en nuestra área de estudio por niveles altitudinales (izquierda) y la diversidad de sitios relevados por función inferida (derecha). Recursos: MDE resolución espacial 5m y precisión vertical submétrica descargado IGN 0032-2015-Catamarca-Sector 5.3, Año 2015.



El Sendero de nuestro interés conectó sitios arqueológicos de gran envergadura conformados por conjuntos habitacionales adosados y canchones de cultivo desde fondo de valle están los sitios Ojo de Agua I y II, arroyo Tiorco, Peschiuta, La Reja, Las 920, etc.; enlazando con otros cuatro sitios también de gran extensión como Pueblo Perdido de la Quebrada I, Pueblo Perdido de la Quebrada II, Tres Mistoles y El Calvario (Fonseca et al., 2018). Continúo vinculando otros sitios habitacionales y de cultivo en la zona de la Estancita y la quebrada del Guaico. Asimismo, el sendero conecta sitios ubicados en las partes superiores de la quebrada del Tala como Pezuña de Buey I, II, y IV y Loma Cortada (Kriscautzky, 1995).

Se debe tener en cuenta que las características particulares de las poblaciones formativas que habitaron esta zona y la movilidad durante sus ocupaciones formaron parte de procesos de ocupación/abandono/reocupación de los sitios. Asimismo, los procesos de interacción durante el desarrollo de dichas ocupaciones dan cuenta de sus formas de vida, tipos de subsistencia y alto grado de sedentarización.

La ubicación estratégica del Sendero lo posiciona como un lugar obligatorio de paso de las sociedades que habitaron este sector del valle de Catamarca. La ocupación prehispánica del territorio fue ininterrumpida hasta la llegada de los españoles. Esta

afirmación, es planteada como una respuesta tentativa a la abundancia de materialidad vinculada a la cultura de la Aguada.

El supuesto se basa en un proceso de larga duración vinculado al aprovechamiento del territorio dado por las características de los asentamientos, ambiente, uso del espacio, construcciones para control de agua, mantenimiento artificial de cuenca, y el resto de la ergología de los sitios, que evidencian similitudes y vinculación entre ellos, - no solo en la representación de personajes felínicos y clases cerámicas, - con diferencias cuali-cuantitativas y temporales en nuestra zona de estudio.

### 3.2 EL PROCESO DE OCUPACIÓN COLONIAL

En el valle de Catamarca la ocupación colonial data de al menos finales del siglo XVI, época en la cual se establecen los primeros asentamientos de españoles. El origen de los mismos se da luego de la fundación de las ciudades de Todos los Santos de la Nueva Rioja en 1591 y San Miguel de Tucumán (Ibatín) en 1565, cuando comienzan a repartirse los territorios intermedios (Guzmán, 1985).

El sistema colonial, originado en una profunda y sostenida reconfiguración espacial, se encontraba sustentado en una de las instituciones vertebrales del dominio como era la encomienda (Castro Olañeta, 2006). Esta ocasionaba una relación asimétrica en detrimento de los naturales al disminuir progresiva y paulatinamente territorio y autonomía, generando en el proceso un nuevo paisaje cultural que giraba en torno a la merced de tierra.

El nuevo orden dejó su impronta en las prácticas sociales resultantes de la ocupación colonial y su influencia en la conformación de la trama social nativa.

El Sendero presenta evidencias de traslados forzosos, puesto que a la cultura material ya existente se agrega otra que no corresponde a esta zona. Se evidencian contextos hispano-indígenas vinculados a la asociación de cerámicas Averías (Cultura material de otras zonas del NOA) sumado a material hispánico, como cuentas de vidrio y loza (Kriscautzky y Togo, 1996). Por otro lado, como lo plantean Caraffini et al. (2015), en el extremo este del sendero existió población asentada en la zona baja del Valle Central de Catamarca, evidenciando el contacto hispano-indígena en lo que hoy es el barrio Ojo de Agua en la ciudad de Catamarca. Donde Brizuela del Moral (2003) señala que Luis de Medina, quien tuvo como encomienda desde 1591 a los indios Choya, fecha en que según el autor, todos los indios del valle quedan encomendados.

Asimismo indica que en la jurisdicción de La Rioja estuvo la merced de Cigalí hacia 1595, fue adquirida por don Gonzalo de Núñez y ubicada según documentación histórica

en una quebrada arriba de Choya a la sierra. (Brizuela del Moral, 2003). Además el padre Antonio Larrouy (1914), menciona la venta de Cigalí hacia el año 1627.

En esta zona de la Quebrada de El Tala, sobre la sierra de Ambato, hacia 1627 se toma posesión de la Merced de Cigalí, siendo el Sendero bajo estudio el nexo de comunicación entre dicha Merced y los demás asentamientos hispanos ubicados en el valle de Catamarca. Con el paso del tiempo, el sendero sirvió de conexión crucial de otros asentamientos hispánicos que se darán en la parte alta de la sierra, como la Merced de Niquixao en 1641, distante a unos 28 kilómetros aproximadamente de la Merced anterior. Por este recorrido en el siglo XVII los franciscanos hallaron una veta de cal que aprovecharon luego para construir el segundo templo franciscano en la ciudad de Catamarca (Caraffini et al., 2015). Es así que los conquistadores aprovecharon la infraestructura vial prehispánica en provecho propio. El Sendero de Las Lomadas de La Aguada les sirvió como comunicación directa de nuevos asentamientos colonizadores y también como aprovechamiento y uso de recursos naturales.

#### 4 CONSIDERACIONES FINALES

Nos hemos planteado el objetivo de trazar un recorrido largo, en función de una periodización que inserta al Sendero de Las Lomadas de la Aguada bajo conceptos de espacio y tiempo de realidades estructurales que contienen la esencia de los cambios y las transformaciones de las sociedades que se fueron conectando en un mismo espacio. La sucesión de tiempos debía periodizarse para entender su relación con el contexto local. Abarcando tanto lo arqueológico, lo geográfico y lo histórico; tomando al espacio como un conjunto de formas producidas por la interacción de múltiples variables a lo largo de la historia, conformada por relaciones sociales y expresadas por respectivas acciones.

La posibilidad de determinar certeramente las categorías de adscripción étnica de estos grupos a partir de las fuentes y la evidencia arqueológica es sumamente difícil, aunque en los lugares que remiten las fuentes históricas de su ocupación, solo hemos hallamos como material diagnóstico cerámica Aguada Portezuelo, de manera que a la fecha tenemos un *hiatus* de 360 años aproximadamente entre las cronologías absolutas y la información proporcionada por la historiografía. Suponemos que la población del valle continuo viviendo allí respecto a las primeras incursiones de los colonizadores españoles en el valle de Catamarca (1550-1562), y para la ocupación efectiva en 1592, donde se hace referencia a indios Choya y otras parcialidades en el valle con una distribución dispersa ubicadas en zonas pedemontanas, los cuales luego serán desterrados, encomendados y entregados a servicios personales.

Podemos decir que la territorialización dada alrededor del Sendero fue bastante importante. Sirvió como vía de comunicación entre poblaciones y también como enclave entre sitios de producción agraria ubicados en un amplio rango geográfico y temporal.

En esa territorialización, el movimiento social se fija en un espacio y en un tiempo donde la Quebrada de El Tala y el valle de Catamarca dan cuenta de las diversas formas que se estructuraron los procesos históricos de ocupación del espacio que fueron generando diversos usos del Sendero de Las Lomadas de La Aguada.

A lo largo del tiempo histórico, el paisaje fue reflejando una diversidad de eventos que nos condujo a pensar este espacio como un constructo que posee una doble connotación. Por un lado, a un sistema de representaciones existentes y duraderas sobre un determinado territorio que mantuvo su identidad por mucho tiempo, sin reflejar otras dinámicas sociales que estuvieron ocurriendo en la región, como la complejidad de sociedades de los períodos Tardíos e Inca, dado que hasta el momento no hemos hallado evidencias que expresen lo contrario.

Por otro lado, la colonización española, modificó toda la estructura territorial y social del valle de Catamarca y la quebrada de El Tala, generando un fuerte proceso de asimilación, traslados y reutilización de todos recursos naturales de la zona para el beneficio personal de encomenderos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anschuetz, K., Wilshusen, R y Schieck, C. (2001). An archæology of landscape: perspectives and directions. *Journal of Archaeological Research* 9 (2):157-211.

Brizuela del Moral, F. (2003). *Historia de Las Mercedes de Tierra en Catamarca*. Siglos XVI al XIX. Ed. Cenedit, Universidad Nacional de Catamarca.

Caraffini C., Puentes, H., Fonseca, E., Villafañez, E. y Melián, C. (2015). Los indios Choya de la conquista a través de la documentación escrita y de la documentación material. En: *Teoría y Práctica de la Arqueología Histórica Latinoamericana*. Año IV. Volumen 4, 79-85. Aspha Ediciones.

Castro Olañeta, I. (2006). Transformaciones y continuidades de sociedades indígenas en el sistema colonial. El pueblo de indios de Quilino a principios del siglo XVI. En *El sistema de explotación colonial: encomienda, actividades productivas, tierra, tributo y actores sociales* (pp.75-118). Alción editora.

Chapa Brunet, C., Uriarte González, A. Vicentgarcía, J. Mayoral Herrera, V. y Perelrasies, J. (2003). Propuesta metodológica para una prospección arqueológica sistemática: El caso del Guadiana Menor (Jaén, España). *Trabajos De Prehistoria* 60 (1):11-34.

Criado Boado, F. (1999). Del Terreno Al Espacio: Planteamientos Y Perspectivas Para La Arqueología Del Paisaje. En: *Capa*, 6. Santiago De Compostela, España.

Criado Boado, F. 1998. La Monumentalización Del Paisaje: Percepción Y Sentido Original En El Megalitismo De La Sierra De Barbanza (Galicia). En: *Trabajos De Prehistoria* 55, N° 1. Madrid.

Fonseca, E., Puentes, H. y Melián, C. (2018). Sitios residenciales, temporarios y estacionales en la quebrada de El tala, Valle de Catamarca *VII Congreso Nacional de Arqueometría*. pp.254-257. Universidad Nacional de Tucumán.

Fonseca, E., Acuña, G y Kriscautzky, N. (2014). Materialización de las prácticas sociales en el sector II de Pueblo Perdido de La Quebrada, (Valle de Catamarca). *Revista Cuadernos de la Facultad de Humanidades y Ciencias Sociales*, 45, 37-68. Universidad Nacional de Jujuy.

Guzmán, G. (1985). *Historia Colonial de Catamarca*. Ed. Miltón.

Kriscautzky, N. y Togo, J. (1996). Prospección arqueológica en el Valle Central de Catamarca, Departamentos Valle Viejo, Capital, Fray Mamerto Esquiú, Paclín y Ambato. *Actas y Memorias del XI Congreso Nacional de Arqueología Argentina (13º Parte)*. Tomo XXV (1/4), 27-34. Revista del Museo de Historia Natural de San Rafael. Mendoza.

Kriscautzky, N. (1995). Avances en la arqueología del Formativo Inferior en el Valle de Catamarca *Revista de Ciencia y Técnica*, 2(2), 65-82. Secretaría de Ciencia y Tecnología Universidad Nacional de Catamarca.

Larrouy, A. (1914). *Los indios del valle de Catamarca*. Buenos Aires. Imprenta Coni.

Maldones, E. (1918). La Merced de Sigalí. *Revista de Derecho, Historia y Letras*. Año XX. Tomo LXI. pp. 540-551. Talleres Gráficos Rosso y Compañía.

Melián, C., Fonseca, E., Puentes, H., Caraffini, C. y Herrera, A. (2019). Paisaje, Prospecciones y Teledetección en el tramo SSE de la Quebrada de El Tala. *XX Congreso Nacional de Arqueología Argentina: 50 años de arqueologías*, pp. 331-340. Universidad Nacional de Córdoba.

Olivera, D. (2001). Sociedades Agropastoriles Tempranas: El Formativo Inferior del Noroeste Argentino. En E. Berberian y Nielsen, A. (Coord.) *Historia Argentina Prehispánica*, Tomo I (pp. 83-125). Brujas.

Santos, M. (1985). *Espaço e método*. São Paulo Edit. Nobel.

# CAPÍTULO 13

## ESTUDIO DE MODELOS MATEMATICOS PARA CALCULO DEL BIOGAS PRODUCIDO EN UN VERTEDERO

Data de submissão: 16/01/2023

Data de aceite: 03/02/2023

### **Sandra Maria Martinez**

Mg. Ingeniera Civil  
Dpto Ing. Mecánica  
Facultad Regional Tucumán  
Universidad Tecnológica Nacional  
Prov. Tucumán – Argentina  
Cvar: sandramartinez

### **Patricia María Albarracin**

Mg. Ing. Azucarera  
CEDIA  
Facultad Regional Tucumán  
Universidad Tecnológica Nacional  
Prov. Tucumán – Argentina  
Cvar: palbarracin

### **Mg. ing. Luis Francisco Garcia**

Dpto. Mecánica  
Facultad Regional Tucumán  
Universidad Tecnológica Nacional  
Prov. Tucumán – Argentina  
Cvar: luisfranciscogarcia

### **Santiago Ezequiel Torres**

Dpto. ing Electrica  
Facultad Regional Tucumán  
Universidad Tecnológica Nacional  
Prov. Tucumán – Argentina

**RESUMEN:** En este trabajo se estudió el aprovechamiento sustentable del potencial energético de los gases provenientes de la disposición de los residuos sólidos urbanos (RSU) generados en el municipio de Tafí Viejo-Tucumán Argentina, mediante tecnología de vertederos controlados. Se evaluó el potencial energético del biogás producido por el componente inorgánico de degradabilidad rápida no tratado y el componente orgánico de los RSU. Para la estimación de la producción de biogás se estudiaron modelos matemáticos y se compararon resultados obtenidos de la aplicación de diferentes modelos: LandGem simplificado, Modelo mexicano y el LandGEM (v.3.02) - EPA E.E.U.U, aceptados por IPCC (Intergovernment Panel on Climate Change, para ello se consideraron las características físicas del entorno; la cantidad y calidad de residuo vertido anualmente. Estos datos servirán luego para calcular la energía eléctrica que se puede generar con el biogás captado. Los resultados obtenidos mostraron potencialidad del vertedero para la producción de biogás y su aprovechamiento energético considerando que el caudal obtenido obedece a condiciones climáticas, técnicas de operación y tecnologías de captación y transporte. Este estudio pretende propiciar proyectos de economía circular y aporta a la transformación del RSU en un activo sustentable.

**PALABRAS CLAVE:** Biomasa. Residuos sólidos urbanos. Abastecimiento energético. Bioenergía.

## STUDY OF MATHEMATICAL MODELS TO CALCULATE THE BIOGAS PRODUCED IN A LANDFILL

**ABSTRACT:** In this work, was studied the sustainable use of the energy power of gases from the disposal of Urban Solid Waste (MSW) generated in the municipality of Tafi Viejo-Tucumán, Argentina. For the estimation of biogas production, mathematical models were studied and results obtained from the application of different models were compared: Simplified LandGem, Mexican Model and LandGEM (v.3.02) - US EPA, accepted by IPCC (Intergovernment Panel on Climate Change). For this, the physical characteristics of the environment were considered, as well as the quantity and quality of waste dumped annually. These data will then be used to calculate the electrical power that can be generated with the captured biogas. The results obtained showed the potential of the landfill for the production of biogas and its energy use, considering that the flow obtained is due to climatic conditions, operating techniques, and collection and transportation technologies. This study aims to promote circular economy projects and contributes to the transformation of the MSW into a sustainable asset.

**KEYWORDS:** Biomass. Solid urban waste. Energy supply. Bioenergy.

### 1 INTRODUCCIÓN

El crecimiento económico y el incremento de la prosperidad de la población generan un mayor consumo de energía a nivel mundial, a su vez existe la necesidad de impulsar una transición más rápida hacia un futuro con menos emisiones de carbono y la posibilidad de incorporar energías renovables sustentables (BP 2019). En la actualidad se está incrementando el empleo de las energías de origen renovable en relación con el siglo anterior y está previsto que su utilización sea cada vez mayor (IEA 2017).

Por otro lado, el problema de los residuos sólidos urbanos (RSU), en la gran mayoría de los países y particularmente en determinadas regiones, se viene agravando como consecuencia del acelerado crecimiento de la población y concentración en las áreas urbanas, el desarrollo industrial, los cambios de hábitos de consumo y mejor nivel de vida, así como también debido a otra serie de factores que conllevan a la contaminación del medio ambiente y al deterioro de los recursos naturales (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2017).

Los actuales sistemas de gestión de residuos sólidos urbanos incorporan tecnologías con el fin de valorizar el pasivo energético de los RSU. (Waste-to-Energy-WTE).

La conversión de RSU en energía es hoy una actividad extendida en países del primer mundo, con el objetivo fundamental de disponer en forma eficiente los residuos producidos por las comunidades, minimizando así la contaminación ambiental asociada a su inadecuado manejo y disposición (Castellón Zelaya y Rivera Madriz, 2015). En este

sentido, en el mundo, se estudia el potencial de valoración energética directa de los residuos sólidos urbanos (RSU), y la optimización del aprovechamiento energético de los RSU con miras a la inclusión de este vector energético en el plan de energías renovables (IDAE, Madrid 2011).

Este trabajo trata sobre el aprovechamiento sustentable del potencial energético de los gases provenientes de la disposición de los residuos sólidos urbanos (RSU) generados en el municipio de Tafí Viejo mediante la tecnología de vertederos controlados y forma parte de una tesis de Maestría en Ingeniería Bioenergética.

En este estudio se evalúa el potencial energético del biogás producido por el componente inorgánico de los RSU desechados en la planta de reciclaje y el componente orgánico y de degradabilidad rápida (papel cartón, madera y textiles) de los RSU, (gestionados por el municipio de Tafí Viejo). mediante la tecnología de vertedero controlado.

Se estimó la producción de metano mediante el uso de modelados matemáticos y se usó el más aceptado por IPCC (Intergovernment Panel on Climate Change) que es el LandGEM (v.3.02) - EPA E.E.U.U; considerando las características físicas del entorno; la cantidad y calidad de residuo vertido anualmente. Estos datos servirán luego para calcular la energía eléctrica que se puede generar con el biogás captado.

## 2 METODOLOGÍA

Para poder proyectar el potencial de generación de biogás desde los RSU se estudiaron y compararon tres modelos matemáticos.

- Modelo de Scholl Canyon o LandGem simplificado.
- LandGEM (v.3.02) - EPA E.E.U.U.
- Modelo Mexicano de Biogás, 2.0 - EPA.
- GasSim (UK) Modelo MDL-UNFCCC (Herramienta para determinar las emisiones de metano evitadas en CDF RSU).

El Modelo de Scholl Canyon o LandGem simplificado es una ecuación exponencial de decaimiento de primer orden que se basa en que la tasa de generación de gas en un instante determinado es función de la masa disponible de residuos (M), el potencial de generación de gas (LO), la tasa de generación de gas (k) y la edad de los residuos. Este modelo ignora las tres primeras etapas de la actividad bacteriana y se basa simplemente en las características observadas del crecimiento de las bacterias en los sustratos. Los parámetros del modelo son determinados empíricamente por medio de la correlación de datos de campo con mediciones en la variación de la humedad y otras condiciones dentro del vertedero.

El Modelo LandGEM (Landfill Gas Emisión Model) v. 3.02 es un programa desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. Está basado en la ecuación de Scholl-Canyon, con la particularidad de que la masa de residuos aceptada en el año  $i$ -ésimo es dividida en submasas con el objetivo de lograr un mayor refinamiento del modelo, diferenciándose del modelo de Scholl-Canyon en que este integra la producción de gas anualmente, en tanto que la última versión del modelo LandGEM v3.02 integra la generación de metano en incrementos de un décimo de año produciendo menores valores de emisiones respecto de las versiones precedentes para un mismo valor de  $k$  (coeficiente de velocidad de generación de metano).

Según Amini et al. (2012) el modelo es relativamente insensible a la variación de los parámetros  $k$  y  $L_0$ . Para mejorar la sensibilidad del modelo, es necesario incluir la adición otros parámetros o utilizar un modelo de mayor orden. Sin embargo, estos cambios podrían comprometer una de las principales ventajas de este modelo, su simplicidad (Amini et al, 2012).

El Modelo Mexicano de Biogás Versión 2.0 provee automáticamente valores para índice de generación de metano ( $k$ ) y el potencial de generación de metano  $L_0$  (SCS Engineers 2009). Estos pueden ser modificados de acuerdo con las características *in situ*.

En estos modelos pueden tomarse valores preestablecidos de  $K$  y  $L_0$ , pero también pueden calcularse según las características particulares de sitio y residuos.

Se puede asimilar en cantidad de lluvia a la zona centro interior con precipitaciones entre 750- 1000 mm, con características climáticas similares y considerando la degradación del residuo DRMR (moderadamente rápida ya que, se consideran orgánicos y rechazos de residuo reciclable de cartón, papel en gran porcentaje).

Se aplico los modelos a los datos de RSU del Municipio de Tafi Viejo, Tucumán.

Se asumió que la composición del gas en volumen es de 50% metano y 50% dióxido de carbono (US EPA 2.005; Sharma y Reddy, 2004).

Se asumió que la producción de gas encuentra su máximo justo después de su emplazamiento, considerando un determinado tiempo de retraso en el cual se considera que se establecen las condiciones anaeróbicas, y luego la producción decrece exponencialmente, dado que el contenido de materia orgánica en el residuo es consumido.

### 3 RESULTADOS

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 1 según los distintos modelos aplicados.

Tabla 1: Cuadro comparativo con resultados de QCH4 m3/año según las distintas metodologías aplicadas.

Año	modelo Landgem simplificado		modelo Landgem 3,02 a)	modelo Landgem 3,02 b)	modelo Mexicano
	Q (m3de CH4)/	Qm3 anual	Q m3/anual	Q m3/anual	Q m3/anual
2020	42654,28	42654,28	0,00	0,00	0
2021	39374,96	82029,24	95252,57	74307,72	117655,53
2022	36347,76	118377,00	185859,62	142902,39	226591,59
2023	33553,29	151930,28	272047,71	206223,25	327454,38
2024	30973,66	182903,95	354032,35	264675,78	420842,21
2025	28592,36	211496,31	432018,56	318634,26	507309,06
2026	26394,14	237890,45	506201,34	368444,21	587367,84
2027	24364,92	262255,38	576766,18	414424,59	661493,45
2028	22491,71	284747,09	643889,53	456869,84	730125,60
2029	20762,52	305509,61	707739,24	496051,73	793671,42
2030	19166,27	324675,87	768474,96	532221,19	852507,84
2031	17692,74	342368,61	826248,56	565609,80	906983,89
2032	16332,49	358701,10	881204,51	596431,37	957422,71
2033	15076,83	373777,93	933480,23	624883,27	1004123,50
2034	13917,70	387695,63	983206,44	651147,68	1047363,29
2035	12847,69	400543,32	1030507,46	675392,79	1087398,57

Se encontró que la mayoría de los modelos tienden a sobreestimar la generación de biogás, sin embargo, se ha registrado que el modelo LandGEM tiende a subestimar dichas emisiones (Thompson et al, 2009; Amini et al, 2011; Ogor y Guerbois, 2005 en Amini et al, 2011) Esto puede considerarse como comportamiento conservador del modelo desde el punto de vista del aprovechamiento del biogás frente a las incertidumbres asociadas a los procesos físicos, químicos y biológicos de la generación de biogás.

Otra modificación de LanGem considera la siguiente ecuación donde se estima la generación máxima de metano teniendo en cuenta los años posteriores al cierre.

## 4 CONCLUSIONES

Como conclusión de este trabajo observamos que se puede determinar mediante modelos matemáticos la cantidad de metano producido en el vertedero controlado propuesto para luego estimar su conversión a energía eléctrica.

La variación en la producción de biogás de un vertedero es sensible a las condiciones ambientales y operativa del mismo, y el análisis de las posibilidades debe particularizarse para cada caso.

El modelo más aceptado por IPCC (Intergovernment Panel on Climate Change) es el LandGEM (v.3.02) - EPA E.E.U.U.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Amini H., Reinhart D., Mackie K. (2012).** "Determination of first-order landfill gas modeling parameters and uncertainties". Waste Management 32, 305-316. February 2012 Waste Management 32(2):305-16 DOI: 10.1016/j.wasman.2011.09.021.

**BP. 2019.** BP (British Petroleum) Energy Outlook 2019 edition. Disponible en: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2019.pdf>.

**(IEA 2017).** IEA. 2017. Global oil supply to lag demand after 2020 unless new investments are approved soon. International Energy Agency. 6 de marzo de 2017. Disponible en: <https://www.iea.org/>(Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2017).

**Castellón Zelaya y Rivera Madriz, 2015).** Aprovechamiento energético y estabilización de residuos sólidos urbanos tratados en digestores anaeróbicos de la planta de biogás de San Marcos, Nicaragua. Presentado XXIX Congreso Centro Americano <https://www.anisanic.org/documentos/Aprovechamientoenergetico.pdf>

(IDAE, Madrid 2011). IDAE, Madrid 2011. Situación y potencial de valoración directa de los residuos Estudio técnico PR 2011-2020. Disponible en [https://www.documentos\\_11227\\_e15\\_residuos\\_c3ead071.pdf](https://www.documentos_11227_e15_residuos_c3ead071.pdf)

**Ogor, Y., Guerbois, M., 2005.** Comparison of landfill methane emission models: a case study. Tenth International Waste Management and Landfill Symposium, Sardinia, Italy.

**Sharma H.D. y Reddy K.R. (2004).** "Geoenvironmental Engineering. John Wiley & Sons, New Jersey).

**SCS Engineers 2009). SCS Engineers. (2009).** Manual de Usuario Modelo Mexicano de Biogás Versión 2.0 [en línea]. [http://www.epa.gov/lmop/documents/pdfs/manual\\_del\\_usuario\\_modelo\\_mexicano\\_de\\_biogas\\_v2\\_2009.pdf](http://www.epa.gov/lmop/documents/pdfs/manual_del_usuario_modelo_mexicano_de_biogas_v2_2009.pdf) 22/02/2014).

**Thompson, s., Sawyer j., Bonam r., j.e. Valdivia. (2009).** building a better methane generation model: validating models with methane recovery rates from 35 canadian landfills. waste management 29: 2085–2091.

**US EPA 2.005; US-EPA.** Global anthropogenic Non-CO2 greenhouse gas emissions: 1990-2020. U.S. EPA, 2005, Washington DC.

## TECNOLOGÍA BTS-MP<sub>DRY</sub> PARA LA LIMPIEZA DEL BIOGÁS. UNA FORMA EFICIENTE DE ELIMINAR COMPONENTES PELIGROSOS DEL BIOGÁS DE VERTEDEROS

*Data de submissão: 08/02/2023*

*Data de aceite: 20/02/2023*

**Joaquín Reina Hernández**

Biogas & Gases Technologies

Dpto. Bioenergía

Dr. Ingenieros Industrial

Barcelona España

<https://orcid.org/0000-0001-6351-6678>

**RESUMEN:** En el presente trabajo se explica la tecnología BTS-MPdry para la limpieza de biogás. El trabajo se centra en la limpieza del biogás para eliminar todos los compuestos peligrosos para su uso como biocombustible. Para ello, se ha diseñado, construido y puesto en marcha una planta para este fin. En la planta se combinan diferentes operaciones unitarias (enfriamiento, secado, adsorción de carbón activo y lavado y filtración) que entregan un alto nivel de limpieza del biogás. La planta se puede dividir en dos partes: Limpieza gruesa. Esta primera está relacionada con la eliminación de vapor de agua e hidrocarburos pesados, así como cierta cantidad de siloxano principalmente tipo D<sub>4</sub> y D<sub>5</sub> y la segunda. Limpieza fina relacionada con la eliminación

de siloxanos y H<sub>2</sub>S y también compuestos orgánicos volátiles. Los resultados muestran la efectividad de estas tecnologías para la eliminación de contaminantes del biogás cuyos valores son superiores en todos los casos al 98% de remoción.

**PALABRAS CLAVES:** Biogás. Tecnologías. Purificación. Siloxanos. Vertederos.

**BTS-MP-DRY. TECHNOLOGY FOR BIOGAS CLEANING. AN EFFICIENT WAY TO REMOVE DANGEROUS COMPONENTS FROM BIOGAS COMING FROM LANDFILLS**

**ABSTRACT:** In the present work is explained the BTS-MPdry technology for biogas cleaning. The work focuses on the biogas treatment to remove all dangerous compounds for its use as biofuel. For it, it has been designed, built and startup a plant for this aim. The plant is combined different unit operations (cooling, drying, active carbon adsorption, scrubbing and filtration) that deliver an elevated level of cleaning biogas. The facility can be dividing in two parts: The first is related with water vapor and heavy hydrocarbon removal, as well as certain amount of siloxane and the second with siloxanes and H<sub>2</sub>S removal and volatile organic compounds. The results show the effectiveness of this technologies for biogas pollutants removal whose values is superior in all cases to 98% of removing.

**KEYWORDS:** Biogas. Technologies. Purification. Siloxanes. Landfills.

## 1 INTRODUCCIÓN

El biogás es una mezcla de gases formada principalmente por metano ( $\text{CH}_4$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y trazas de otros componentes como:  $\text{H}_2\text{S}$ , vapor de agua, siloxanos e hidrocarburos, todos perjudiciales para su uso o aplicación. Para un uso adecuado del biogás como biocombustible en equipos de cogeneración o para la producción de biometano, se requiere, por tanto, una limpieza previa para eliminar o reducir todos los compuestos peligrosos antes mencionados con el fin de garantizar la vida útil de la máquina utilizada para esta aplicación. El objetivo del trabajo es describir la tecnología BTS-MPdry, su desarrollo y aplicación para la limpieza de biogás, como una planta multipropósito para la limpieza del biogás, donde se combinan varias técnicas de remoción de componentes perjudiciales. Entre ellas, secado por enfriamiento, enfriamiento mecánico, lavado con su propio condensado y adsorción en carbón activo como etapa de refinado del biogás, lo cual permite obtener un biogás con un alto grado de limpieza minimizando el contenido de energía.

Actualmente aparece de dos tipos de biogás según su fuente de producción u origen.

Biogás de sistemas no controlados, es decir, se produce de forma natural. Por ejemplo, el biogás vertederos. Este tipo de biogás se caracteriza por la presencia de humedad (vapor de agua), siloxanos, hidrocarburos pesados y halogenados y en ocasiones sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ).

Biogás de sistemas controlados, es decir, proceso de digestión anaerobia, en este tipo de procesos existe un control exhaustivo en la producción del biogás. En este caso, se puede seleccionar el proceso, el tipo de reactor de acuerdo al sustrato a tratar, así como las condiciones de operación. En este caso, existe un amplio rango de posibilidades, relacionado con el tipo de proceso y su equipamiento.

La tabla 1 muestra los diferentes tipos de biogás según su origen y efectos de sus componentes.

Gases	Sistemas controlados			Sistemas no controlados	
	Residuos Agrícolas (%)	Lodos de Depuradora (%)	Residuos Industriales (%)	Vertederos RSU (%)	Efecto
Metano	50-80	50-80	50-70	45-65	Combustible
$\text{CO}_2$	30-50	20-50	30-50	34-55	Inerte
Vap $\text{H}_2\text{O}$	Saturación	Saturación	Saturación	Saturación	Perjudicial
$\text{H}_2$	0-2	0-5	0-2	0-1	Combustible
$\text{H}_2\text{S}$	100-7000 ppm	0-1	0-8	0,5-3000 ppm	Corrosivo
$\text{NH}_3$	50-100 $\text{mg}/\text{m}^3$	Trazas	Trazas	Trazas	Corrosivo
$\text{CO}$	0-1	0-1	0-1	Trazas	Combustible
$\text{N}_2$	0-1	0-3	0-1	0-20	Inerte
$\text{O}_2$	0-1	0-1	0-1	0-5	Corrosivo
Siloxanos	NR	0-100 $\text{mg}/\text{m}^3$	NR	0-50 $\text{mg}/\text{m}^3$	Abrasivo
HCH	NR	Trazas	NR	10-4000 $\text{mg}/\text{m}^3$	Perjudicial
NR. No reportados		HCH. Hidrocarburos pesados y halogenados (Cl,F,Br)			

Como se puede observar de la tabla 1 el biogás procedente de procesos controlados presenta alta concentración de metano ( $\text{CH}_4$ ). En muchos procesos desarrollados actualmente llega a alcanzar por encima del 90 %, relativa baja concentración de  $\text{CO}_2$ . Elevadas concentraciones de impurezas tales como: sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ), amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) y siloxanos que están en dependencia del tipo de sustrato que se usa en el proceso de digestión.

Sin embargo, el biogás procedente de proceso no controlado, por ejemplo, vertedero se caracteriza por tener relativa baja concentración de metano ( $\text{CH}_4$ ), relativa alta concentración de  $\text{CO}_2$ , altas concentraciones de  $\text{O}_2$  y  $\text{N}_2$  los cuales merman la posibilidad de obtener un biometano de alta calidad por técnicas tradicionales. En caso de querer obtener un biometano de alta pureza se debe de aplicar tecnologías como la criogénica o la PSA (tamiz molecular) para alcanzar dichos resultados.

Este tipo de biogás también presenta altas concentraciones de hidrocarburos y en ciertos casos elevadas concentraciones de sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ) o dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) principalmente cuando el residuo que entra al vertedero va cargado de materia orgánica o por la presencia de sulfatos en algún tipo de residuo o lugar de depósito.

Entre los componentes de mayor incidencia negativa en el aprovechamiento energético del biogás generado en vertedero y/o en plantas depuradoras (EDAR/PTAR) están los siloxanos, los cuales producen daños en los motores y equipos, reduciendo, tanto la eficacia de operación, como la vida útil de los mismos por el efecto abrasivo que producen en las partes internas de éstos. Este efecto se debe a la deposición de sílice u óxido de sílice que se produce en las diferentes partes como resultado de la combustión que tiene lugar en la parte interna del motor.

Para muchas aplicaciones y uso del biogás, se debe mejorar la calidad de este gas. Los principales componentes para eliminar son: el  $\text{H}_2\text{S}$ , el vapor de agua, los siloxanos y los hidrocarburos, tanto los halogenados, como los pesados y otros.

Existen actualmente dos grandes métodos de limpieza del biogás y muchas técnicas usadas para este fin, por ahora, el método de combinación de técnicas es el método que mejores resultados reporta dada las características de biogás de ser un gas multicomponente.

El objetivo de este trabajo se centra en el desarrollo de una planta multipropósito para la limpieza de biogás con el fin de eliminar el mayor número de componentes peligrosos de él para su uso o aplicación como materia prima para la producción de energía (electricidad y/o calor) u otros productos como el biometano.

En ella, se combinan diferentes operaciones unitarias de la industria química con el objetivo de obtener una limpieza de biogás de alta calidad, entre ellas se pueden citar: enfriamiento, lavado, filtración y adsorción sobre carbón activo.

## 2 DESARROLLO

### 2.2 PROBLEMÁTICA POR RESOLVER. REMOCIÓN DE SILOXANOS

#### 2.2.1 Origen

Entre los componentes de mayor incidencia, tanto en el aprovechamiento energético del biogás, como en su uso para la producción de Biometano están los siloxanos que se encuentran en el biogás generado en plantas depuradoras de aguas residuales (EDAR) y vertederos. Estos componentes producen daños en las máquinas y tecnologías empleadas para su valorización, reduciendo la vida útil de las mismas por el efecto abrasivo y de deposición (película) que producen en las partes internas de éstos, lo que conlleva el aumento del coste de operación por los reiterados cambios y sustitución de aceites y partes interna de las mismas.

Los siloxanos son compuestos creados por el hombre y se aplican en muchos productos industriales como cosméticos, alimentos, aditivos para plásticos, productos de limpieza, etc.

Los siloxanos son una familia de compuestos orgánicos formados por cadenas lineales o cíclicas de silicio, oxígeno y grupos metilos. Son fabricados en un abanico de formas, entre los que se incluyen fluidos de alta y baja viscosidad, gomas, elastómeros y resinas, se encuentran en cantidades significativas en una amplia y variada gama de productos domésticos, tales como detergentes, champús, desodorantes, pastas dentífricas, cosméticos, entre otros.

La mayoría de ellos se volatilizan rápidamente a la atmósfera y con el tiempo se degradan en dióxido de carbono, sílice y agua. Pero algunos, no obstante, acaban en las aguas residuales y en los sólidos urbanos de desguace y se produce su inevitable acumulación en vertederos y depuradores, donde se consideran uno de los contaminantes más difíciles de controlar.

Estos son compuestos orgánicos formados por siliconas, oxígeno y grupos metilos con unidad estructural  $-(CH_3)_2SiO$ , y peso molecular típicamente en el rango comprendido entre 150 a 600. Su solubilidad en agua decrece con el aumento de su peso molecular y éstos pueden ser volátiles o no.

#### 2.2.2 Efecto

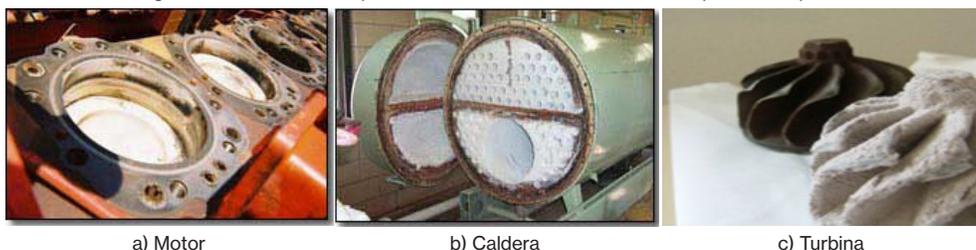
Las siliconas a diferencias de los sulfuros no reaccionan con el agua para formar ácidos; sin embargo, durante la combustión las moléculas de siloxanos se rompen liberando oxígeno y silicio; esta última se combina con otros elementos formando silicatos, sílice y otros

compuestos cristalinos que se depositan en la cámara de combustión (fundamentalmente en la parte alta de la camisa), en las culatas y en las caras de las válvulas.

Estas incrustaciones provocan el desgaste por abrasión de diferentes partes internas de los motores.

La figura 1 muestra las incrustaciones que causan los siloxanos en diferentes tipos de máquinas.

Figuras 1. Incrustaciones que causan los siloxanos en diferentes tipos de máquinas.



El contenido de siliconas permisibles para un buen funcionamiento de los motores de generación no debe exceder por lo general  $< 1 \text{ mg/Nm}_3$ , aunque cada fabricante de máquina pone sus límites. Un contenido superior indicará posibles problemas de deposición de sílice, y con ello, el quemado de válvulas de escape, pérdidas de holguras y por tanto fugas de aceite de lubricación.

En el caso de las turbinas a biogás, dado que operan a altas velocidades de rotación, es decir, por encima de las 10.000. rpm requieren un balanceado, tanto estático, como dinámico de sus partes móviles muy preciso, estas disposiciones de siloxanos pueden crea descompensaciones bastantes serias en las mismas llegando a acusar importantes averías.

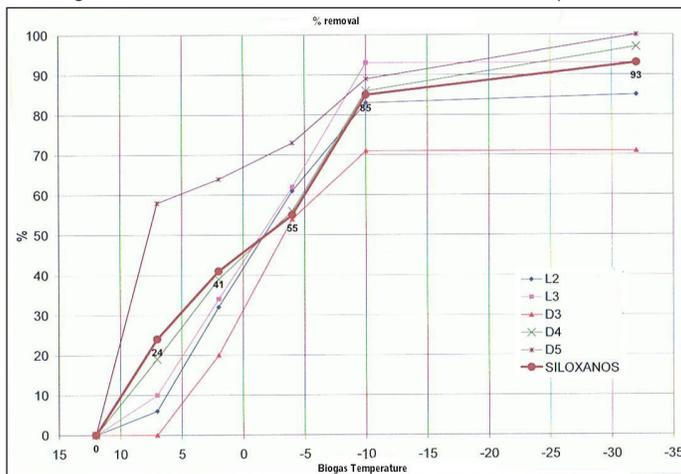
### 2.2.3 Tratamientos

Los sistemas actuales para la eliminación de dichos compuestos para evitar daños mecánicos y operativos en las diferentes máquinas involucradas en la producción de energía utilizan técnicas que poseen por lo general una o dos etapas, entre las cuales se pueden citar: el enfriamiento, subenfriamiento, la adsorción en carbón activo/silicagel, filtros de grafito, determinados tipos de resinas, membranas, el lavado con ciertos reactivos (metanol, ácido sulfúrico, mezcla de hidrocarburo, etc.).

Una técnica de amplio espectro en la limpieza del biogás es el sistema de enfriamiento condensación pues permite, además de eliminar humedad en forma de vapor de agua, elimina cierto tipo de siloxanos principalmente los de estructura cíclicas,

es decir, los tipos D. La figura 2 muestra la influencia de la temperatura en la eliminación de siloxanos. Según este gráfico cuando el biogás se enfría hasta los 2 °C de temperatura, se puede llegar a conseguir hasta un 40 % o más de eliminación de los siloxanos presentes en el biogás en dependencia del tipo/familia de siloxanos.

Figura 2. Reducción del contenido de siloxanos con la temperatura.



### 2.3 DESCRIPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA

La tecnología para la purificación del biogás BTS-MPdry cuenta con un conjunto de equipos y dispositivos que interconectados entre sí permiten eliminar por medio físico (mecánico, térmico y químico-físico), el contenido de humedad, reducir el nivel de siloxanos, hidrocarburos pesados y trazas H<sub>2</sub>S hasta valores adecuados para su uso en la generación de electricidad o calor con mínimo consumo de energía y adsorbente. La tecnología está completamente automatizada y cuenta con un panel de control dónde se visualizan diferentes variables de operación como: temperatura, flujo, presión y humedad.

La tecnología BTS-MPdry dispone de lavador-recuperador, intercambiador de calor y filtro de carbón activo como etapa de refinado. El lavador-recuperador es una parte importante de la tecnología, debido a, que permiten tener un menor consumo de energía térmica y al mismo tiempo acondiciona el biogás para que ingrese al filtro de carbón activo en cuanto a temperatura y humedad relativa HR.

De esta manera se recupera alrededor de un 15 hasta un 30 % de la energía para la limpieza del biogás que se requiere para la operación de secado vía enfriamiento condensación. Este nivel de recuperación depende de la temperatura del biogás y el caudal involucrado. Mediante este método se reduce la cantidad de carbón activo para la limpieza del biogás o se alarga la vida útil del mismo debido al acondicionamiento previo

que experimenta el biogás antes de entrar al filtro, al mismo tiempo se reduce el costo de operación de la tecnología, aspecto clave en la economía del proceso.

Otro aspecto importante de la tecnología es la posición vertical de los equipos intercambiadores de calor (enfriamiento y recuperador) que por su posición mejora el coeficiente de transferencia de calor y facilita el drenaje del condensado hacia el fondo. Esto minimiza la posibilidad de que el condensado que se forma se congele en los tubos en la temporada de invierno donde la temperatura puedes llegar alcanzar valores bajo cero ( $0^{\circ}\text{C}$ ) debido a que el tiempo de permanencia del condensado en tubo es corto debido a la fuerza de gravedad y a la fuerza de empuje del propio flujo del gas.

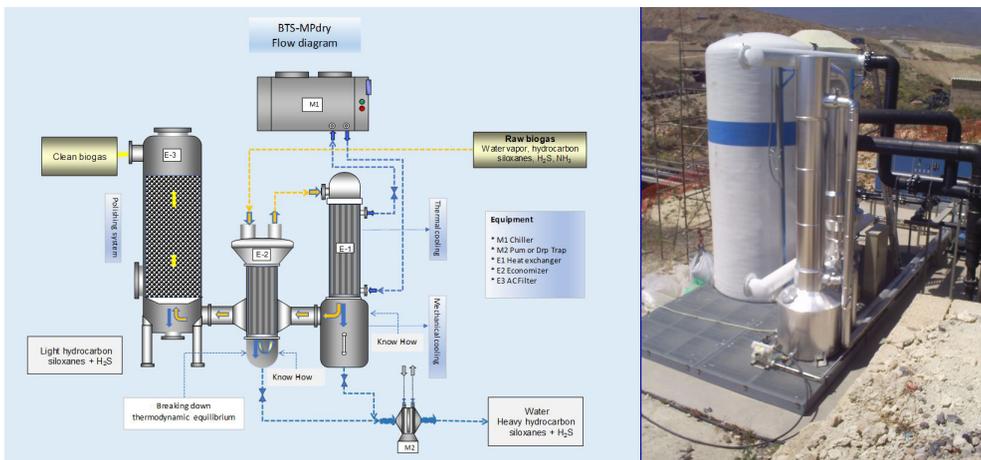
La planta se puede dividir en dos partes. La primera relacionada con la remoción bruta.

Esta etapa consiste en eliminar fundamentalmente vapor de agua, hidrocarburos pesados, partículas y cierta cantidad de siloxano, generalmente los del tipo  $D_4$  y  $D_5$  (estructuras cíclicas) enfriando hasta  $2^{\circ}\text{C}$ . Figura 2 y 3.

La segunda parte relacionada con la eliminación fina (pulido), es decir, de ciertos componentes del biogás como los siloxanos de estructura lineal (tipo L), traza  $\text{H}_2\text{S}$  e hidrocarburos de bajo peso molecular por adsorción sobre carbón activado. En este paso juega un papel fundamental la correcta selección del carbón activado y la velocidad del gas en el lecho de carbón activado para alcanzar un adecuado tiempo de retención. La figura 3 muestra las etapas de la tecnología desarrollada.

La figura 3 muestra el diagrama de flujo y una foto de la planta construida para el vertedero de Arico-Tenerife- Isla Canarias que explota la entidad Urbaser.

Figura 3. Diagrama de flujo. Tecnología BTS-MPdry Vertedero e Arico Tenerife. Cortesías de BGasTech.



## 2.4 DISEÑO DE TECNOLOGÍA. BTS-MPDRY

La tecnología desarrollada por el grupo BGasTech para la eliminación de tales compuestos es una tecnología basada en la combinación de operaciones y denominada tecnología multipropósito por las diferentes tareas que desempeña para la limpieza del biogás. En ella, se combinan diferentes operaciones unitarias de la industria química con el objetivo de obtener una limpieza de biogás de alta calidad, entre ellas se pueden citar: enfriamiento (térmico y mecánico), condensación, lavado con el propio condensado, filtración y adsorción sobre carbón activo.

La tecnología fue desarrollada para el Vertedero de Arico-Tenerife. Islas Canarias en el 2008 para dar solución a la problemática antes planteada.

Para el diseño y selección de equipos de la tecnología para la limpieza del biogás se desarrollaron diferentes analíticas relacionadas con la composición del biogás y tomas de datos como: flujo de biogás a tratar, presión y temperatura de trabajo. Para poder comparar los resultados que reporta la tecnología y poder conocer su eficacia se desarrollaron también analíticas del gas después de instalar la tecnología.

La comparativa entre las analíticas permite conocer que componentes se deben eliminar y el grado de eliminación de los componentes perjudiciales en el flujo del biogás una vez aplicada la tecnología, así como conocer la eficacia de eliminación alcanzada por está según las condiciones de operación establecidas. Esta analítica también es útil para conocer el tipo de adsorbente a utilizar, en caso del uso de carbón activo, su cantidad y el tiempo de vida útil del mismo. Los filtros de carbón activo son dos (2) de doble lecho y trabajan en paralelo, es decir, mientras uno opera el otra está en parada y/o recambio del medio filtrante.

La tecnología se ha concebido para trabajar en la línea de aspiración, es decir, antes de los soplantes de biogás lo que garantiza que el biogás que entra a la soplante es un biogás limpio lo que garantiza el buen funcionamiento y el cumplimiento de la vida útil de estas maquinas que son el corazón del sistema de captación del biogás del vertedero.

Las condiciones de diseño se muestran en la tabla 2. La temperatura de enfriamiento del biogás se estableció en 2 °C que de acuerdo con la figura 1 permite reducir la humedad del biogás y a su vez el porcentaje de siloxanos hasta un valor cercano al 40 % principalmente los del tipo D<sub>4</sub> y D<sub>5</sub> (cadena cíclica) mayoritarios en el biogás de vertederos.

## 3 RESULTADOS

En la tabla 2 se muestran los resultados obtenidos en la aplicación práctica de esta tecnología en la limpieza del biogás del vertedero (vertedero de Arico, isla de Tenerife). En

el mismo se presentan a su vez la eficiencia de remoción de cada componente y el ahorro energético que se obtiene con el uso de recuperador de energía (economizador).

Los resultados reportados en la tabla 2 muestran la calidad del biogás alcanzada en su limpieza y el ahorro energético que se obtiene al incorpora el economizador a esta tecnología. Por ello, la calidad del biogás lograda garantizara, por un lado, el buen funcionamiento del sistema de cogeneración y una mejora en la calidad de los gases de escape emitido a la atmosfera por el motor de generación. Todo esto se traduce en la reducción de los costes operativos de todo el sistema de cogeneración, así como, en el cuidado del medioambiente. Por otro lado, al estar ubicada la tecnología antes del sistema de bombeo del biogás (soplantes), corazón de estas instalaciones, se garantiza, tanto una operación segura y estable de estas máquinas, así como, el cumplimiento de su vida útil.

La tabla 2. Resultados alcanzados con la aplicación de la tecnología BTS-MPdry.

<b>Flujo</b>	3.000,00	Nm <sup>3</sup> /h		
Temp <sub>Entrada</sub>	50 °C			
Presión <sub>Entrada</sub>	- 200mbar			
<b>Componentes</b>				
	<b>Entrada</b>	<b>Salida</b>	<b><math>\eta_{Remoción}</math></b>	<b>Ahorro energía</b>
	(mg/Nm <sup>3</sup> )	(mg/Nm <sup>3</sup> )	%	%
Siloxanos	38	< 1	> 97,3	21
H <sub>2</sub> S	120	< 1	> 99,2	
BTEX	750	< 5	> 99,3	
Hidrocarburos	3957	< 20	> 99,5	
Peso CA	10.000,00	kg		
Nº Filtros	2			
Vida útil	> 2	meses		
Costo CA	1,9	€/kg		

De la tabla 2 se observa que la eficacia de remoción de los diferentes componentes está en todos los casos por encima del 97 % permitiendo alcanzar valores de concentración de siloxanos en el biogás inferiores al 1 %, así como, menores del 20 % en el caso de los hidrocarburos valores lo que significa que es un biogás que cumple con los estándares para ser utilizado en la producción de energía vía motor a gas.

## 4 CONCLUSIONES

1. La combinación de técnicas de limpieza como el enfriamiento de diferentes tipos y la adsorción en carbón activado son técnicas que, combinadas, constituyen un método adecuado para tatar gases multicomponentes como el biogás. Con esta combinación de técnica se alcanza una remoción de siloxano superior al 97 % y el porcentaje de remoción de otros componentes algo superior al 99 %.
2. Que el uso del economizador (recuperador-lavador) además de minimizar el consumo energético, permite cierta remoción de componentes tales como:  $H_2S$  y  $NH_3$  debido al lavador de borboteo incorporado al mismo y a condiciona el biogás para su entrada a la etapa de filtración lo cual favorece la eficacia de esta operación.
3. El mayor logro de este proyecto ha sido introducir en el mercado de la limpieza del biogás una tecnología multipropósito BTS-MPdry para el tratamiento del biogás, que combinando etapas y a veces de forma simultánea permite eliminar diferentes componentes dañinos del biogás, entregando un biogás de alta calidad constituyendo una materia prima para la producción de energía u otros productos como el Biometano.

## REFERENCIAS

Reina Hernández, Joaquin. (2021). El biogás una ecológica y económica fuente de energía. Instalaciones de captación, limpieza y acondicionamiento del biogás. Maquinas, equipos y tecnologías. Barcelona España. Editorial círculo Rojo.

BIOGAS UPGRADING AND UTILISATION. IEA Bioenergy. Task 24: Energy from biological conversion of organic waste.

Reina, J. (2002). Plant for biogas treatment for its use as biofuel. 9º Congreso Mediterráneo de Ingeniería Química. Barcelona- Spain.

Reina, J. (2006). Humedad y siloxanos en el biogás generado en vertederos y depuradoras. 99-100. Infoenviron. Octubre.

Reina, J. (2008). Biolimp-Siloxa. Planta multipropósito para la limpieza del biogás. 85-86. Infoenviron. Julio/agosto.

Reina, J. (2014). Biogas cleaning/conditioning. A requirement for optimal working of CHP Systems. Futureenviro. July-August.

Reina, J. (2015). Los siloxanos en el Biogás. Origen, Efecto y Tratamientos. 30-34. Industria química.

Reina, J. (2018). Estudio de la influencia de la limpieza del biogás en las prestaciones del sistema de cogeneración. Tecnología BTS-Biolimp-MPdry. 40-46. Industria química.

Reina, J. (2020). Cómo afectan los componentes indeseables del biogás ( $H_2S$ , Siloxanos e Hidrocarburos) en los auxiliares del motor. Catalizador, silencioso y Chimenea. 64-72. Industria química.

# CAPÍTULO 15

## GEOPOLÍMEROS: EL AVE FENIX DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN EMERGENTES Y SU APLICACIÓN EN LA REMEDIACIÓN AMBIENTAL<sup>1</sup>

Data de submissão: 06/12/2022

Data de aceite: 21/12/2022

**Luis Felipe Rodríguez Alfaro**

Universidad Autónoma de Nuevo León

Instituto de Ingeniería Civil

Departamento de Ecomateriales y Energía

Ciudad Universitaria

San Nicolas de los Garzas

Nuevo León, México

<https://orcid.org/0000-0002-7167-7874>

**Edith Luévano Hipólito**

Universidad Autónoma de Nuevo León

Instituto de Ingeniería Civil

Departamento de Ecomateriales y Energía

Ciudad Universitaria

San Nicolas de los Garzas

Nuevo León, México

<https://orcid.org/0000-0003-2988-405X>

**Leticia Myriam Torres Martínez**

Universidad Autónoma de Nuevo León

Instituto de Ingeniería Civil

Departamento de Ecomateriales y Energía

Ciudad Universitaria

San Nicolas de los Garzas

Nuevo León, México

<https://orcid.org/0000-0003-3328-0240>

**RESUMEN:** El concreto es uno de los materiales antropogénicos más utilizado en el mundo. Sin embargo, el continuo aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero generadas durante su fabricación, obliga a las industrias a buscar alternativas de producción cada vez más ecológicas y sostenibles, aplicando para ello las estrategias de la economía circular, reciclando diferentes residuos industriales para la elaboración de nuevos productos y procesos. Con base en lo anterior, los geopolímeros parecen ser una opción prometedora; al ser un sustituto sustentable del cemento clásico, los cuales pueden poseer características mecánicas superiores y un requerimiento energético inferior, además de que pueden ser fabricados a partir del aprovechamiento de cenizas y otros subproductos industriales. Recientemente, se ha encontrado su funcionalidad para aplicaciones más avanzadas para diferentes aplicaciones de remediación ambiental con procesos avanzados de oxidación. Gracias a su aplicación, la industria del cemento podría convertirse en un futuro cercano en un ente más respetuoso con el medio ambiente al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, consumir menos recursos no renovables y combatir la contaminación ambiental.

**PALABRAS CLAVE:** Geopolímeros. Cementos alternativos. Economía circular. Remediación ambiental. Materiales inteligentes.

<sup>1</sup> Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo financiero a través del proyecto: Paradigmas y Fronteras de la Ciencia 320379 y por la beca doctoral número 805191. Los autores también declaran que no tienen conflictos de intereses financieros en competencia ni relaciones personales conocidas que pudieran haber influido en el trabajo informado en este documento.

## GEOPOLYMERS: THE PHOENIX OF THE EMERGING BUILDING MATERIALS AND THEIR APPLICATION IN ENVIRONMENTAL REMEDIATION

**ABSTRACT:** Concrete is one of the most widely used anthropogenic materials in the world; however, the continuous increase in greenhouse gas emissions during its production is forcing industries to look for a more ecological and sustainable option through the application of circular economy strategies, especially the part about the recycling of industrial wastes. Based on that, geopolymers could be a promising option; as being a sustainable substitute for classic cement, promising mechanical properties and a lower energy requirement; besides it has the advantage of using extensive sources of industrial by-products as raw material and lately it has been found it could be used as a more advanced application for environmental remediation by advanced oxidation process. With its application, the cement industry could become a more environmentally friendly entity in the future by reducing greenhouse gas emissions, consuming fewer non-renewable resources, and combating environmental pollution.

**KEYWORDS:** Geopolymers. Alternative cements. Circular economy. Environmental remediation. Smart materials.

### 1 INTRODUCCIÓN

Hoy en día el mundo ha entrado en una era de desarrollo sostenible y con ello muchas de las industrias se han visto en la necesidad de adaptarse a él. La industria y los materiales de construcción no han estado exentos de estos cambios, al contrario, se han encontrado con una fuerte presión social y política por adecuarse rápidamente a ellos debido a los daños ambientales cada vez más evidentes que ocasionan en el entorno natural. De acuerdo con algunas estimaciones, la industria del cemento consume alrededor del 40% de la producción total de energía (Shehata et al., 2022) y es muy probable que esta tendencia continúe en el futuro debido a su omnipresencia en los edificios e infraestructuras en general. El cemento se utiliza predominantemente en la producción del concreto, seguido del mortero, y se ha convertido en el segundo material más utilizado en masa después del agua (Monteiro et al., 2017). Debido a la escala masiva de producción, solamente este material representa directamente casi el 8% de las emisiones totales del CO<sub>2</sub> a nivel global (Arrigoni et al., 2020), siendo el cemento Portland ordinario (CPO) el material más utilizado y por consiguiente, uno de los máximos responsables de la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) (del Strother, 2019). Dado que las emisiones GEI provenientes de la industria del cemento son sustanciales, su mitigación se ha vuelto el enfoque principal en muchas de las investigaciones durante los últimos años (Miller et al., 2016; Du et al., 2019), junto con la búsqueda de nuevos materiales cementantes alternativos que lo sustituyan. De igual forma, recientes investigaciones se están orientando en que estos cementantes alternativos adquieran nuevas propiedades

para volverlos materiales de construcción inteligentes (Han et al., 2017). Entre ellos, los geopolímeros están sobresaliendo al ser materiales ecológicos, con propiedades físicas y mecánicas sobresalientes, lo que los posicionan como excelentes candidatos para sustituir en algunas aplicaciones al CPO. Además, para su fabricación se está utilizando residuos industriales lo que lo hace congruente con el modelo de economía circular. Por su parte, su estructura tridimensional muestra una gran afinidad para alojar nanopartículas, lo que les permiten volverse materiales de construcción inteligentes.

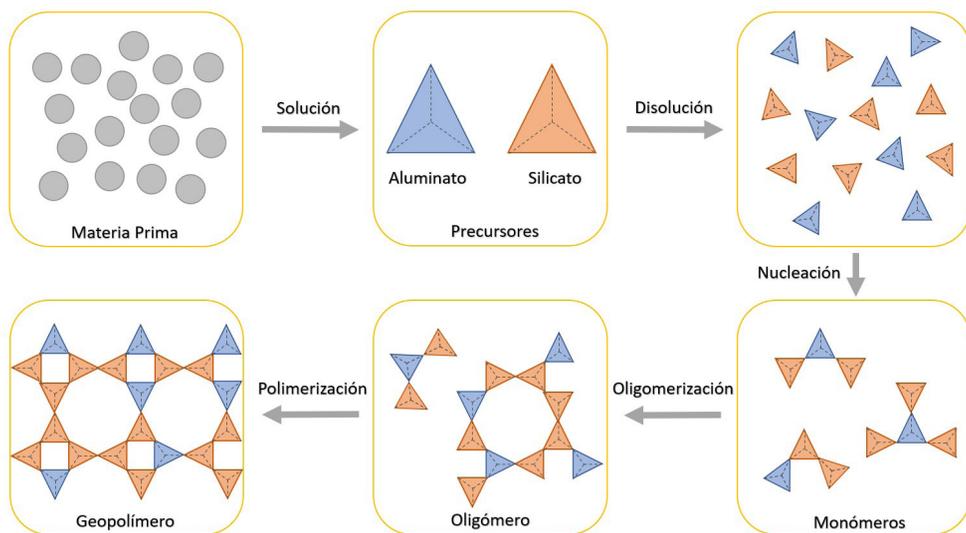
## 1.1 GEOPOLÍMEROS

El término “geopolímero” fue acuñado por primera vez por Joseph Davidovits en 1978 (Davidovits, 1991) y se define como un polímero inorgánico formado a través de la reacción de policondensación de ciertos sólidos derivados de desechos industriales (residuos) que contienen aluminosilicatos (aglutinantes) y que reaccionan con soluciones líquidas ricas en álcalis (activadores). El mecanismo de fraguado y endurecimiento del geopolímero no se comprende aún en su totalidad. Sin embargo, por consenso se ha establecido que el proceso de geopolimerización ocurre debido a la disolución de las materias primas que contienen aluminosilicatos en soluciones alcalinas y que conducen a la formación de monómeros de aluminato y silicato. Estos posteriormente se transforman en oligómeros, para finalmente convertirse en geopolímeros (Shehata et al., 2021) (Figura 1). Como subproductos industriales que se han utilizado como materia prima para estos materiales se encuentran la ceniza volante, el metacaolín, el humo de sílice, las cáscaras de arroz, las arcillas calcinadas, los residuos de vidrio, las zeolitas, entre otros (Zhang et al., 2014). Actualmente se está estudiando la posibilidad de utilizar además cenizas de materiales de construcción, desechos agrícolas o residuos mineros para su elaboración (Shehata et al., 2021).

Todo concreto u hormigón elaborado a partir de geopolímeros ha mostrado excelentes resultados cuando es aplicado en la ingeniería (Liew et al., 2016; Suwan y Fan, 2017), en parte se debe a sus características sobresalientes como es la alta resistencia al fuego, al calor, a la corrosión, a la compresión y a la flexión (Deshmukh et al., 2017). Asimismo, su alta durabilidad superior a la del CPO, que les ayuda a tener una mejor resistencia a la intemperie, los ataques químicos, la abrasión u otro ambiente agresivo, los convierte en una buena alternativa para el cemento convencional (Singh et al., 2015). Algunos estudios consideran que los geopolímeros, una vez endurecidos, exhiben propiedades similares a las rocas naturales densas como el granito o el mármol, lo que ha elevado su atención en fechas recientes (Allali et al., 2016). Al ser clasificado como

cemento verde se considera que produce beneficios ambientales significativos, ya que no solo recicla de manera efectiva los desechos sólidos y ahorra en muchos recursos naturales (piezas claves en la economía circular), sino que también puede reducir las emisiones GEI. Estudios sobre el análisis de ciclo de vida de los concretos geopoliméricos han mostrado que su uso, en el lugar del CPO, podría ayudar a reducir las emisiones GEI de entre un 9% hasta un 64% (McLellan et al., 2011).

Figura 1 – Proceso de formación de los geopolímeros.



La razón principal por la que este aglutinante no ha sido aún más ampliamente adoptado por la industria es debido a la falta actual de estándares regulatorios respaldados por pruebas y datos sobre su funcionalidad a largo plazo (Singh y Middendorf, 2020). Sin embargo, se cree que debido a sus altas propiedades mecánicas y beneficio ambiental, los geopolímeros pueden tener un futuro prometedor como material de construcción prospectivo (Shehata et al., 2021). Si lo anterior le sumamos su alta capacidad para incorporar nanopartículas para que adquiera nuevas propiedades (Zailan et al., 2016) y volverlos materiales de construcción inteligentes, sus perspectivas de uso aumentan aún más.

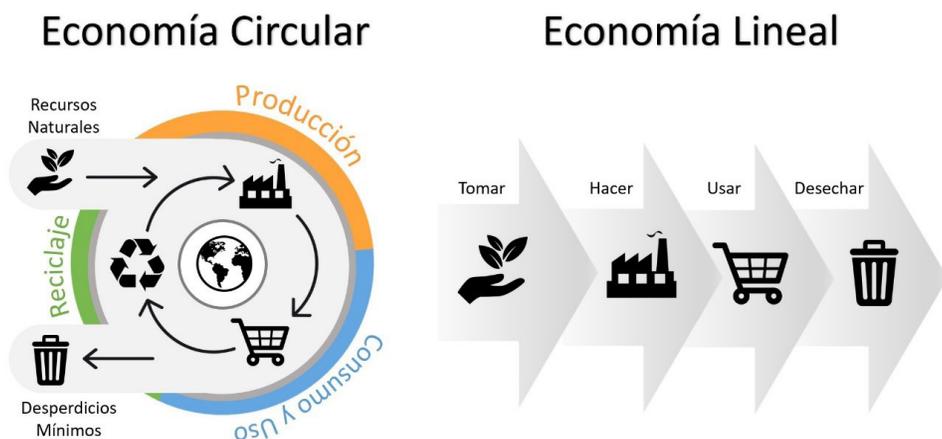
## 1.2 ECONOMÍA CIRCULAR

Para quienes no estén familiarizados con el tema, una economía circular (EC) es un diseño restaurativo y regenerativo que tiene como objetivo mantener los productos, componentes y materiales en su máxima utilidad y valor comercial durante el mayor

tiempo posible en circulación y procurando además una pérdida mínima de su calidad (Figura 2). Todo esto con el objetivo de desvincular el crecimiento demográfico con el consumo de recursos (Adams et al., 2017). Esto en contraposición con el modelo antiguo y lineal de consumo de recursos caracterizado en hacer, usar y desechar los materiales empleados. Gracias a ello, la EC ha logrado notoriedad últimamente debido también a que promete superar la contradicción entre el crecimiento económico con el bienestar ambiental, ambos temas de interés general en la sociedad actual (Marsh et al., 2022).

A pesar de ser de reciente creación y encontrarse aún en etapas iniciales, ya existen escuelas de pensamiento diferente sobre la EC aplicada en la industria constructora, aunque la mayoría de ellas compartiendo los mismos principios fundamentales, los cuales en esencia radican en una mejor gestión de los recursos, una optimización de su consumo y una maximización del bienestar social (Shehata et al., 2022). En la rama de la construcción se espera que con la EC se logre como objetivo final la formación de “edificios circulares”, término usado para definir un inmueble que estuvo diseñado, planificado, construido, operado, mantenido y deconstruido de manera consistente con los principios básicos de la economía circular (Pomponi y Moncaster, 2017).

Figura 2 – Diferencia entre el modelo de economía circular y economía lineal.



Dado que parte del principio de la economía circular es la reutilización y reciclaje de materiales con el objetivo de mantenerlos en circulación el máximo tiempo posible sin que la calidad del producto final se viese afectada, esto con el fin de reducir los flujos de recursos al continuar el uso de componentes aún funcionales para la formación de nuevos productos, evitando así el desperdicio y la extracción de nueva materia prima (Zhang et al., 2022). Los geopolímeros, por su naturaleza, parecen cumplir con este

objetivo volviéndolos candidatos idóneos para la aplicación efectiva de la EC en el sector de la construcción. Esto a pesar de que actualmente se cuenta con otros tipos de cementos considerados verdes (por su baja huella de carbono y por emplear parcialmente materiales reciclados) que pueden suplantar también al CPO (Miller y Myers, 2020). La mayoría de ellos con sus pro/contras y en etapas tempranas de exploración con miras en una indagación más exhaustiva sobre su aplicabilidad a largo plazo (Gartner y Sui, 2018). Sin embargo, siendo pocos de ellos con la capacidad de acoplarse efectivamente a un modelo EC. Solo los geopolímeros parecen predominar por ajustarse en mayor grado con dicho modelo (Singh y Middendorf, 2020) puesto que, además de presentar propiedades reológicas superiores al CPO y una muy alta huella ecológica en comparación con los demás, el reúso de subproductos industriales como componentes reciclados para la síntesis de estos materiales va en línea con las principales directrices afines en las pautas establecidas para una economía circular (Shehata et al., 2022).

### 1.3 APLICACIONES AVANZADAS

A pesar de que la principal aplicación de los geopolímeros se ha restringido a ser una simple alternativa verde para el cemento Portland, recientemente se ha encontrado que sus propiedades son adecuadas para una serie de aplicaciones más avanzadas, tales como adsorbentes, retardadores de flama, aislante térmico y de sonido, regulador de pH, entre otros, así como en la incorporación de catalizadores y fotocatalizadores para la eliminación de contaminantes peligrosos presentes en el aire y en las aguas residuales (Falah y MacKenzie, 2020; Cong y Cheng, 2021).

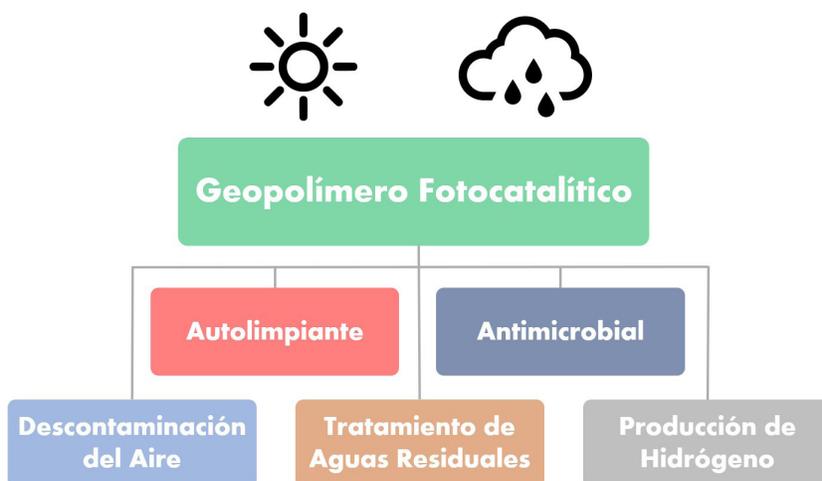
Debido a su alta resistencia a los entornos hostiles, es común que los geopolímeros sean utilizados para la producción de tuberías de alcantarillado, en aplicaciones de suelos que contienen ácidos agresivos (ej. ácido sulfúrico) y cuando se aplica acero reforzado en el concreto y que puede causar corrosión (Mehta y Siddique, 2018). También debido a la alta resistencia a la corrosión por cloruros, los geopolímeros se utilizan para estructuras de concreto como muelles, puentes costeros y soportes bajo el agua debido al constante ataque del agua salada (Almutairi et al., 2021). Fruto de su excelente estabilidad térmica a altas temperaturas, se les ha considerado buenos materiales refractarios con un gran potencial para la prevención de incendios (Shuai et al., 2020). Esta propiedad se le considera fundamental para los nuevos materiales de construcción, dado que pueden ayudar a reducir eficazmente el consumo de energía y contribuir a disminuir el efecto invernadero (Cong y Cheng, 2021). Thang et al. (2017) encontró que geopolímeros preparados a partir de desechos de vidrio mostraron mayor resistencia al calor y al

fuego en comparación con aquellos reportados con cenizas de cascara de arroz. Lahoti et al. (2018) señalaron que cuanto mayor es la resistencia del geopolímero, mejor es la resistencia al fuego por lo que, para los autores, la densificación de algunos sustratos y la curación de microfisuras son importantes para el aumento en la resistencia a la temperatura. Por su parte, Nuaklong et al. (2020) adicionaron nanopartículas de  $\text{SiO}_2$  a un geopolímero elaborado con cenizas de cascara de arroz, lo que mejoró significativamente su resistencia al fuego.

Además del aislamiento térmico, el aislamiento acústico también es crucial en los materiales de construcción inteligentes, particularmente porque absorben el sonido, mejorando el confort acústico para los residentes, lo que reduce los riesgos para la salud asociados con la exposición prolongada a la contaminación acústica (Gao et al., 2020). Se considera que un geopolímero poroso, además de presentar baja conductividad térmica y bajo costo, puede presentar la propiedad de absorción del sonido (Luna-Galiano et al., 2018). Leiva et al. (2019) encontraron que el coeficiente de adsorción del sonido de un geopolímero es directamente proporcional con el aumento de la porosidad abierta; mientras que, El-Naggar et al. (2019) reportaron que al aumentar la porosidad del geopolímero a más del 50% se pueden producir materiales livianos con excelentes propiedades térmicas y acústicas.

Por otro lado, durante las últimas décadas la aplicación de las tecnologías avanzadas de oxidación como la fotocatalisis heterogénea, en materiales de construcción, ha permitido la eliminación de contaminantes ambientales en agua, aire y suelo, usando la energía solar como fuerza impulsora. Esto ha atraído la atención considerablemente, principalmente por la creciente urgencia en desarrollar nuevos materiales que ayuden también a mitigar los efectos del calentamiento global producto de los gases de efecto invernadero (Fermoso et al., 2020). Los geopolímeros se han convertido en una excelente opción para la eliminación fotooxidativa de diferentes contaminantes, a causa de que incorporan más fácilmente los nanomateriales fotocatalíticos, como el  $\text{TiO}_2$ , y muestran una mayor capacidad para absorber e inmovilizar el material peligrosos a degradar en su estructura, (Zailan et al., 2016). La combinación de fotocatalizadores con geopolímeros ya ha sido explorada en la industria de la construcción con diferentes aplicaciones (Figura 3), obteniendo resultados alentadores (Zailan et al., 2016; Gasca-Tirado et al., 2017; Gutiérrez et al., 2020; Ji et al., 2021). Y se espera que esta línea de investigación en un futuro crezca a pasos agigantados.

Figura 3 – Aplicaciones de los geopolímeros fotocatalíticos.



A pesar de las distintas aplicaciones, todavía falta más investigación al respecto, pero se espera que en los próximos años aumente los estudios sobre los geopolímeros como materiales de construcción inteligente (Cong y Cheng, 2021). Y es que, dada la combinación de la funcionalidad con el respeto por el medio ambiente de los geopolímeros (Falah y MacKenzie, 2020), y su capacidad intrínseca para acoplarse a los nuevos lineamientos sobre la economía circular (Shehata et al., 2022) hace que estos nuevos materiales inteligentes lleguen a ser potencialmente importantes en un futuro próximo con el objetivo primordial de aminorar los problemas del cambio climático.

## 2 CONCLUSIONES

Hoy en día, la industria de la construcción es un sector que ejerce mucha presión sobre el entorno natural, por lo que su papel en la transición a una economía circular es primordial, en esencia la parte que trata sobre la reutilización y reciclaje de desechos industriales. En ese sentido, los geopolímeros son una solución viable a los problemas de impacto ambiental, al ser un cemento verde, que emite cantidades más bajas de CO<sub>2</sub> y se forman con residuos reciclados manteniendo sus propiedades mecánicas intactas, por lo que se han vuelto en una alternativa confiable a los materiales cementantes tradicionales. Además, este material inorgánico y ecológico se puede transformar en material de construcción inteligente al actuar como soporte para distintas especies, como el TiO<sub>2</sub>, propiciando la capacidad de eliminar contaminantes ambientales tóxicos, mejorando su rendimiento y/o coadyuvando a mitigar los efectos de los gases de efecto invernadero. Sin embargo, teniendo en cuenta la creciente demanda de concreto

sostenible, se aconseja más estudios al respecto, principalmente aquellos centrados en su operatividad a largo plazo.

## REFERENCIAS

Adams, K. T., Osmani, M., Thorpe, T., y Thornback, J. (2017). Circular economy in construction: current awareness, challenges and enablers. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Waste and Resource Management*, 170(1), 15-24. <https://doi.org/10.1680/jwarm.16.00011>

Allali, F., Joussein, E., Kandri, N. I., y Rossignol, S. (2016). The influence of calcium content on the performance of metakaolin-based geomaterials applied in mortars restoration. *Materials & Design*, 103, 1-9. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.04.028>

Almutairi, A. L., Tayeh, B. A., Adesina, A., Isleem, H. F., y Zeyad, A. M. (2021). Potential applications of geopolymer concrete in construction: A review. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00733. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00733>

Arrigoni, A., Panesar, D. K., Duhamel, M., Opher, T., Saxe, S., Posen, I. D., y MacLean, H. L. (2020). Life cycle greenhouse gas emissions of concrete containing supplementary cementitious materials: cut-off vs. substitution. *Journal of Cleaner Production*, 263, 121465. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121465>

Cong, P., y Cheng, Y. (2021). Advances in geopolymer materials: A comprehensive review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.03.004>

Davidovits, J. (1991). Geopolymers: Inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 37(8), 1633-1656. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/bf01912193>

del Strother, P. (2019). Manufacture of Portland Cement. In *Lea's Chemistry of Cement and Concrete* (pp. 31-56). <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100773-0.00002-2>

Deshmukh, K., Parsai, R., Anshul, A., Singh, A., Bharadwaj, P., Gupta, R., Mishra, D., y Sitaram Amritphale, S. (2017). Studies on fly ash based geopolymeric material for coating on mild steel by paint brush technique. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 75, 139-144. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2017.03.002>

Du, Z., Wei, J., y Cen, K. (2019). China's carbon dioxide emissions from cement production toward 2030 and multivariate statistical analysis of cement consumption and peaking time at provincial levels. *Environ Sci Pollut Res Int*, 26, 28372-28383.

El-Naggar, K. A. M., Amin, S. K., El-Sherbiny, S. A., y Abadir, M. F. (2019). Preparation of geopolymer insulating bricks from waste raw materials. *Construction and Building Materials*, 222, 699-705. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.182>

Falah, M., y MacKenzie, K. J. D. (2020). Photocatalytic Nanocomposite Materials Based on Inorganic Polymers (Geopolymers): A Review. *Catalysts*, 10(10), 1158. <https://www.mdpi.com/2073-4344/10/10/1158>

Fermoso, J., Sánchez, B., y Suarez, S. (2020). Air purification applications using photocatalysis. In *Nanostructured Photocatalysts* (pp. 99-128). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-817836-2.00005-3>

Gao, H., Liu, H., Liao, L., Mei, L., Zhang, F., Zhang, L., Li, S., y Lv, G. (2020). A bifunctional hierarchical porous kaolinite geopolymer with good performance in thermal and sound insulation. *Construction and Building Materials*, 251, 118888. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118888>

- Gartner, E., y Sui, T. (2018). Alternative cement clinkers. *Cement and Concrete Research*, 114, 27-39. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.002>
- Gasca-Tirado, J. R., Manzano-Ramírez, A., y Reyes-Araiza, J. L. (2017). 8 - The potential use of geopolymer for cleaning air. In H. Savastano Junior, J. Fiorelli, & S. F. dos Santos (Eds.), *Sustainable and Nonconventional Construction Materials using Inorganic Bonded Fiber Composites* (pp. 221-233). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102001-2.00009-7>
- Gutiérrez, Villaquirán-Caicedo, M., Ramírez, B., Astudillo, y Mejia, R. (2020). Evaluation of the Antibacterial Activity of a Geopolymer Mortar Based on Metakaolin Supplemented with TiO<sub>2</sub> and CuO Particles Using Glass Waste as Fine Aggregate. *Coatings*, 10, 157. <https://doi.org/10.3390/coatings10020157>
- Han, B., Zhang, L., y Ou, J. (2017). *Smart and Multifunctional Concret (Photocatalytic Concrete)*. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-4349-9>
- Ji, Z., Zhang, Y., Qi, X., Wang, Y., Xia, X., y Pei, Y. (2021). Low-cost and facile fabrication of recyclable and reusable waste-based geopolymer for visible-light photocatalysis degradation. *Journal of Cleaner Production*, 310, 127434. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127434>
- Lahoti, M., Wong, K. K., Tan, K. H., y Yang, E.-H. (2018). Effect of alkali cation type on strength endurance of fly ash geopolymers subject to high temperature exposure. *Materials & Design*, 154, 8-19. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.05.023>
- Leiva, C., Luna-Galiano, Y., Arenas, C., Alonso-Fariñas, B., y Fernández-Pereira, C. (2019). A porous geopolymer based on aluminum-waste with acoustic properties. *Waste Management*, 95, 504-512. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.06.042>
- Liew, Y.-M., Heah, C.-Y., Mohd Mustafa, A. B., y Kamarudin, H. (2016). Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review. *Progress in Materials Science*, 83, 595-629. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2016.08.002>
- Luna-Galiano, Y., Leiva, C., Arenas, C., y Fernández-Pereira, C. (2018). Fly ash based geopolymeric foams using silica fume as pore generation agent. Physical, mechanical and acoustic properties. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 500, 196-204. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2018.07.069>
- Marsh, A. T. M., Velenturf, A. P. M., y Bernal, S. A. (2022). Circular Economy strategies for concrete: implementation and integration. *Journal of Cleaner Production*, 362, 132486. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132486>
- McLellan, B. C., Williams, R. P., Lay, J., van Riessen, A., y Corder, G. D. (2011). Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement. *Journal of Cleaner Production*, 19(9), 1080-1090. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.02.010>
- Mehta, A., y Siddique, R. (2018). Sustainable geopolymer concrete using ground granulated blast furnace slag and rice husk ash: Strength and permeability properties. *Journal of Cleaner Production*, 205, 49-57. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.313>
- Miller, S., y Myers, R. (2020). Environmental Impacts of Alternative Cement Binders. *Environ. Sci. Technol.*, 54(2), 677-686. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b05550>
- Miller, S. A., Horvath, A., y Monteiro, P. J. M. (2016). Readily implementable techniques can cut annual CO<sub>2</sub> emissions from the production of concrete by over 20%. *Environmental Research Letters*, 11(7), 074029. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/7/074029>

- Monteiro, P. J. M., Miller, S. A., y Horvath, A. (2017). Towards sustainable concrete. *Nature Materials*, 16(7), 698-699. <https://doi.org/10.1038/nmat4930>
- Nuaklong, P., Jongvivatsakul, P., Pothisiri, T., Sata, V., y Chindaprasirt, P. (2020). Influence of rice husk ash on mechanical properties and fire resistance of recycled aggregate high-calcium fly ash geopolymer concrete. *Journal of Cleaner Production*, 252, 119797. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119797>
- Pomponi, F., y Moncaster, A. (2017). Circular economy for the built environment: A research framework. *Journal of Cleaner Production*, 143, 710-718. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.055>
- Shehata, N., Mohamed, O. A., Sayed, E. T., Abdelkareem, M. A., y Olabi, A. G. (2022). Geopolymer concrete as green building materials: Recent applications, sustainable development and circular economy potentials. *Science of The Total Environment*, 836, 155577. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155577>
- Shehata, N., Sayed, E. T., y Abdelkareem, M. A. (2021). Recent progress in environmentally friendly geopolymers: A review. *Science of The Total Environment*, 762, 143166. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143166>
- Shuai, Q., Xu, Z., Yao, Z., Chen, X., Jiang, Z., Peng, X., An, R., Li, Y., Jiang, X., y Li, H. (2020). Fire resistance of phosphoric acid-based geopolymer foams fabricated from metakaolin and hydrogen peroxide. *Materials Letters*, 263, 127228. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.127228>
- Singh, B., Ishwarya, G., Gupta, M., y Bhattacharyya, S. K. (2015). Geopolymer concrete: A review of some recent developments. *Construction and Building Materials*, 85, 78-90. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.036>
- Singh, N. B., y Middendorf, B. (2020). Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview. *Construction and Building Materials*, 237, 117455. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117455>
- Suwan, T., y Fan, M. (2017). Effect of manufacturing process on the mechanisms and mechanical properties of fly ash-based geopolymer in ambient curing temperature. *Materials and Manufacturing Processes*, 32(5), 461-467. <https://doi.org/10.1080/10426914.2016.1198013>
- Thang, N. H., Kien, P. T., y Abdullah, M. M. A. B. (2017). Lightweight Heat Resistant Geopolymer-based Materials Synthesized from Red Mud and Rice Husk Ash Using Sodium Silicate Solution as Alkaline Activator. *MATEC Web Conf.*, 97, 01119. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20179701119>
- Zailan, S., Mahmed, N., Abdullah, M. M. A. B., y Sandu, A. V. (2016). Self-cleaning geopolymer concrete - A review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 133, 012026. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/133/1/012026>
- Zhang, C., Hu, M., Di Maio, F., Sprecher, B., Yang, X., y Tukker, A. (2022). An overview of the waste hierarchy framework for analyzing the circularity in construction and demolition waste management in Europe. *Science of The Total Environment*, 803, 149892. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149892>
- Zhang, Z., Provis, J. L., Reid, A., y Wang, H. (2014). Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction. *Construction and Building Materials*, 56, 113-127. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.081>

# CAPÍTULO 16

## MACROPOROUS SILICON STRUCTURES IN 700 NM AND 500 NM<sup>1</sup>

Data de submissão: 21/12/2022

Data de aceite: 10/01/2023

### Angel Rodríguez

Dept. of Electrical Engineering  
Universitat Politècnica de  
Catalunya (UPC)  
Barcelona, Spain  
ORCID: 0000-0002-0890-0842

### Didac Vega

Dept. of Electrical Engineering  
Universitat Politècnica de  
Catalunya (UPC)  
Barcelona, Spain

### Jordi Llorca

Institute of Energy Technologies  
(INTE)  
Universitat Politècnica de  
Catalunya (UPC)  
Barcelona, Spain  
ORCID: 0000-0002-7447-9582

**ABSTRACT:** Macroporous Silicon is a structured material with which innovative

<sup>1</sup> ACKNOWLEDGEMENT: This work has been funded by the Spanish Ministerio de Ciencia e Innovación with grant PID2021-124572OB-C31. The authors declare no conflict of interest.

optical and electrical characteristics can be obtained. It consists in a crystalline silicon slab where tubular perforations are made. Several fabrication methods exist, electrochemical etching being one of the most versatile. With it, the diameter of the pores can be modulated in depth, resulting in 3D structures. Also, structures with very large aspect ratio (depth / diameter) can be achieved. One particular field of use of macroporous silicon is in photonics. Such applications generally require the fabrication of ordered structures whose dimensions are directly correlated with the optical response of the fabricated devices. In particular pore diameter and lattice pitch define the working wavelengths of the devices. Common uses of optical technology in areas such as communications or gas sensing require working with wavelengths in the Near Infrared (NIR) and the Medium Infrared (MIR) regions. That is, for wavelengths ranging from 1  $\mu\text{m}$  to 20  $\mu\text{m}$ . Devices able to work in the shorter wavelengths thus call for photonic structures of smaller dimensions. To enable such devices, the macroporous silicon fabrication technology has been developed and improved to allow the fabrication of structures with 700 nm and 500 nm lattice pitch.

**KEYWORDS:** Macroporous silicon. Electrochemical etching. Gas sensors. Mid Infrared.

## 1 INTRODUCTION

Macroporous silicon (MpS) is a versatile material which has found uses in many fields. For example, one field in which macroporous silicon has awakened great interest is in optical and photonic applications. In particular, the creation of periodic structures confers the ability to alter the passage of electromagnetic waves through the material, thus creating the so-called photonic crystals (PhCs), resulting in photonic devices with dimensions comparable to the wavelength, and whose spectral characteristics can be designed to meet some specifications.

Several techniques exist for the fabrication of MpS. One of the most practical and flexible is the electrochemical etching (EE) of silicon. This technique is simple to use and allows changing the shape of the structure during the processing with little effort. Obtained structures can have very high aspect ratios, and the pores may have modulated profiles. Three-dimensional photonic crystals can therefore be easily fabricated that work in the three spatial axes.

The range of possible applications for macroporous silicon is really wide. For optical applications, EE offers advantages over more traditional, microelectronics-centric, techniques. Some devices based on PhCs are modulators, sources, or receivers. Other applications include filters and optical resonators for chemical/gas sensors. Macroporous silicon has also been proposed as a photonic crystal for the creation of omnidirectional selective optical filters. Some of the possible applications for devices of this nature are gas detection or thermo-photovoltaic applications. Further applications include anti-reflective layers and selective thermal emitters. Non optical applications of MpS include electronic devices (high capacity capacitors), energy storage (batteries), micro-fluidic applications (drug delivery, Brownian filters), chemical applications (reactors, catalysts), etc. In these cases, the use of macroporous silicon is highly novel and few groups are investigating these applications.

A common trait of photonic structures is that the photonic response is directly dependent on geometric aspects of the photonics crystals. Of these geometrical parameters, the most relevant are the pore diameter, the pore lattice, and the lattice pitch (in general photonic crystals require that the features – pores – are arranged in an ordered – periodical – fashion). Many interesting optical applications work in the infrared wavelength range, especially for gas sensing, where many gases have fingerprint responses in the  $1\mu\text{m}$  to  $4\mu\text{m}$ . Optical communications also has important uses in this range of wavelength.

## 2 FABRICATION OF MACROPOROUS SILICON

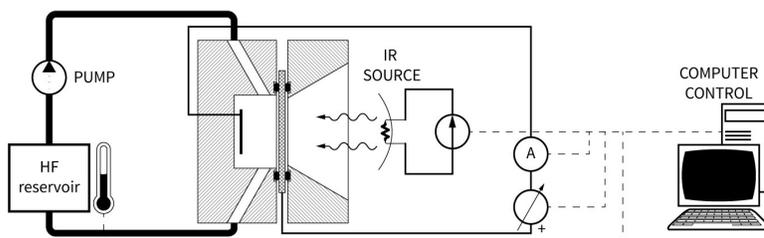
Porous silicon (PS) is commonly made by electrochemical anodizing of silicon (Si) wafers in solutions containing hydrofluoric acid (HF). Silicon can be selectively dissolved when immersed in hydrofluoric acid solutions and an electric current is passed through it. The anodic dissolution of silicon in an aqueous HF medium takes place only at the HF/Si interface where the charge carriers meet the  $F^-$  anions. For the silicon etch to occur, positive electrical carriers (holes) are required for the electrochemical reactions to take place in the vicinity of the anode to dissolve. Both *n*- and *p*-type silicon can be dissolved by this technique (Lehmann, 1993; Lehmann & Föll, 1990). The chemical dissolution occurs on certain specific regions of the surface giving rise to small etch pits. Afterwards, electrical currents are preferentially focused to the tips of these pits, resulting in the enlargement of the pits in the following the current lines therefore giving rise to the tubular growth characteristic of electrochemically etched MpS.

Aside from the applied current, the physical characteristics of the silicon substrate and other parameters are also key in the obtained results. In particular, HF concentration, illumination, temperature, crystallinity and wafer resistivity are some of the parameters that one needs to take into account for the EE of Si. For example, the size of the pores is closely related to the type and level of substrate doping (Lehmann, 1996).

For *n*-type silicon substrates, since the material is not capable of supplying holes, an external way must be provided. One of the most widespread methods is to produce them by photogeneration, as proposed by Lehmann [2], illuminating the working silicon with a suitable light (IR with  $\lambda \approx 1\mu\text{m}$ ). Generally, the sample is illuminated from the opposite side to the one exposed to HF. The generated holes then diffuse to the face that is being attacked making possible to control the reaction. This method is known as *photo-assisted EE*. An schematic diagram of the etching cell and control system used by our group is shown in Figure 1.

Current density and electrode potential determine the amount of silicon etched per unit time. Interestingly, the rate at which silicon is dissolved is fairly constant in the “vertical” direction, so any change in photocurrent results in a net change of the pore diameter.

Figure 1. Diagram of the system used in our lab for the manufacture of macroporous silicon.



## 2.1 ORDERED GROWTH OF PORES

Unless the pores' position is predefined prior to EE, pores grow randomly throughout the substrate surface, resulting in a structure with a non-uniform pore spatial placement and size. In general, this is not desirable if the MpS structures are to be used as PhCs; such structures are called *random macroporous silicon*. The opposite is *ordered macroporous silicon* and to fabricate these structures the places where pores are desired must be prepared before etching. The method used here is through lithography (by any suitable method like UV or NIL). This step uses a mask to define the pore pattern on the silicon substrate. This allows very flexible designs, for example it is possible to define areas with a regular pattern, while other areas may define trenches.

## 2.2 MODULATION OF THE DIAMETER OF THE PORES

As previously stated, dissolved silicon is proportional to the current flow through the electrochemical cell, however, the pore front advances at an almost constant speed. This implies that, assuming stable growth regime, the current will etch a larger or smaller diameter pore in a given time. This can be approximated with a cylinder of fixed height and changing radius. This property can therefore be used to create pores with *changing profile in depth*, i.e. modulated pores.

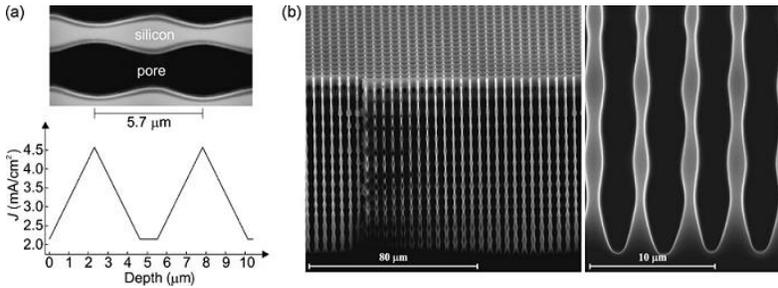
In particular, for ordered MpS, the current density at the pore front (the pore tips) has been found to be  $j_{\text{tip}} = J_{\text{PS}}$ , where  $J_{\text{PS}}$  is a characteristic current density value that depends on the substrate and cell electrical properties and other parameters. Now it is possible to define the *porosity* of the etched sample as the ratio of “air volume” to total volume  $P = V_{\text{etched}}/V_{\text{Si}}$ . At a given time, this can be approximated as the 2-D cross-section area ratio of air over silicon at depth  $z(t)$ . A further simplification can be done for ordered patterns of pores, as in this case the porosity ratio of the repeating unitary cell is the same as the whole sample porosity, thus  $p = A_{\text{pore}}/A_{\text{unit cell}}$ . If we now apply that the pore area is proportional to the passing current and that the pores can be approximated by a cylinder, we obtain that.

$$p = \frac{A_{\text{pore}}}{A_{\text{unit cell}}} = \frac{\pi \left(\frac{d}{a}\right)^2}{4} = \frac{J}{J_{\text{PS}}}$$

where  $d$  is the pore diameter,  $a$  is the lattice pitch, and  $J$  is the steady state current density applied to the electrochemical cell. From this result, it can be seen that the *pore diameter is proportional to the current*. An example of a PS layer with modulated porosity is shown in Figure 2.

Although there are limits to the achievable shapes, imposed by the electrochemical porosification system, it is possible to create very complex structures such as sinusoidal modulations [14], embedded defects [15], etc. MPS pores can have diameters as small as 100 nm [16], The smallest reported 3-d MPS is approximately 500 “nm” in periodicity.

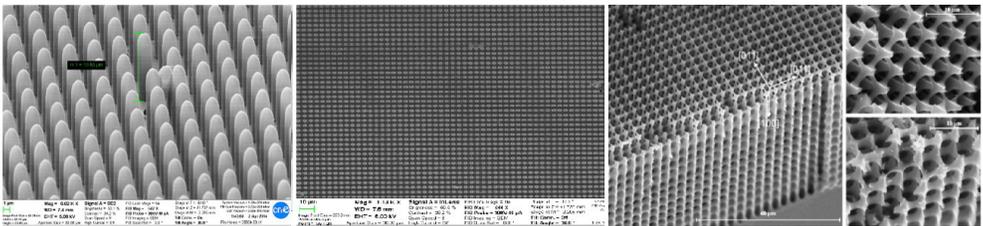
Figure 2. (a) triangular etching current profile and SEM micrograph of the resulting modulated pore. (b) SEM image of 14-period modulated pores arranged in a square lattice with a pitch of 4 μm . (Trifonov et al., 2008)



### 2.3 POST-PROCESSING

Macroporous silicon technology has very interesting properties (Levy-Clement et al., 1992) that allow the manufacture of devices in many application areas (Cullis et al., 1997; Lehmann & Rönnebeck, 2002; Rodríguez et al., 2005). However, to widen the range of possible uses of MpS, post-processing of the as etched samples is a necessary step. Some notable examples of the attainable applications now are the micromanipulation of particles, catalysts and biosensors, gas sensors (López et al., 2010; Vega et al., 2014) or microfluidics devices etc. Some common post-processes are the oxidation of the fabricated structures, the creation of suspended membranes with an alkaline etch of the back face of the MpS sample, or the change of the surface characteristics by layer deposition. Examples of post-processed samples are shown in Figure 3.

Figure 3: SEM micrographs of the fabricated macroporous membrane with straight pores. Left: Bird's eye view of the silicon dioxide microfilms on the back of the sample. Center: top view of silicon dioxide micropillars. Right: bird's-eye view SEM photograph of the 3D structure produced by symmetrically modulated pore etching and subsequent pore enlargement, with successive oxidation and oxide removal steps. The structure is a fully 3D network of interconnected holes in silicon.



### 3 SUB-MICRON PORE NETWORKS

Macroporous silicon samples with interpore separation of several microns are routinely manufactured by different research groups using photo-assisted EE. In the following sections, the fabrication process of ordered arrays of pores with dimensions and periodicities below  $1\ \mu\text{m}$  is described.

#### 3.1 SUB-MICRON PORE NETWORKS. STATE OF THE ART

Optical filters in the mid infrared band require a reduction of the periodicity. Unlike the technology for the manufacture of periodicity samples of  $2\ \mu\text{m}$  or greater, there is not much experience published in literature in the manufacture of modulated SMP samples for periodicities lower than  $1\ \mu\text{m}$ . It has been therefore necessary to develop the technology, advance in the knowledge of the material and to characterize the structures. Such technology is optimal applied to gas sensing by spectral and non-dispersive infrared techniques.

In our group, technology for manufacturing macroporous silicon matrices with 0.7 and 0.5 micron periodicities has been developed and improvements have been obtained with respect to those published in the literature. In comparison to other groups, we have been able to obtain the smallest 3D MpS that has been published has a periodicity of approximately 500 nm (Bru et al., 2017).

#### 3.2 SUBMICRON MANUFACTURING TECHNOLOGY

Fabrication of submicron structures required the correct adaptation of the etching parameters to have stable growth conditions. The process steps are similar to those described for the fabrication of larger structures. The first difference is the lithography method used for the pore etch pit formation. In this case, Nano Printing Lithography (NIL) has been used. In contrast to the more common UV lithography, the mask is transferred to the substrate by mechanical means, by pressing a master mould onto the sample. This mould can be fabricated by techniques such as e-beam lithography, laser interferometry, or other methods.

In the work presented here, patterns with square networks of wells have been designed. The dimensions are just right to create MpS with periodicities of 700 nm and 500 nm.

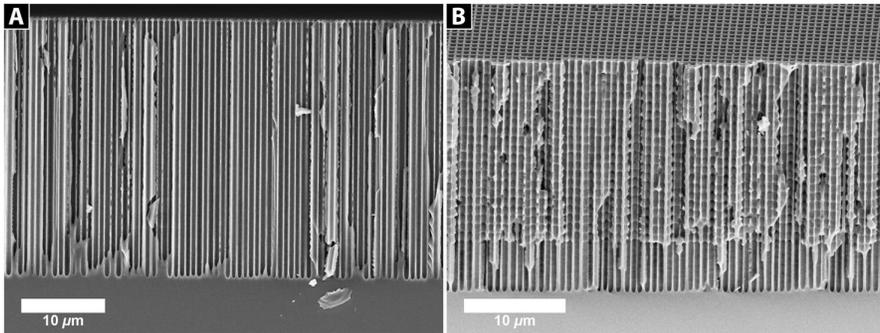
## 4 700 NM PITCH PORE ARRAYS

In our group we have been able to advance the EE method to allow us the routine fabrication of MpS samples with modulation, geared at gas sensing.

### 4.1 SAMPLE PREPARATION

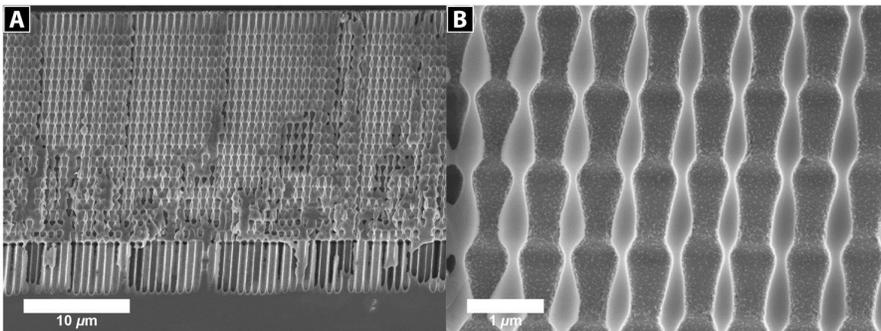
Samples were processed as described in the previous points to obtain a suitable substrate for anodic porosification. The mask was created using NIL and the pore etch pits later defined by a short anisotropic silicon etch. The pattern used is a square lattice of pores with 700 nm periodicity.

Figure 4. SMP samples of 700 nm periodicity, straight (A) and modulated (B), after optimization of the attack parameters. You can see the uniform growth of the pores and the absence of defects or dead pores.



After preparation, EE was performed, obtaining up to 40 μm deep pores, resulting in an aspect ratio better than 40:1, both straight and with noticeable modulations (see Figure 4.) Good optical response requires high refractive index contrast (i.e. porosity change). This has been achieved, as seen in Figure 5. Later, optimized samples, have achieved modulation indexes  $M$  better than 41%, with pore diameters in the range  $d_{\text{pore}} = 250 \text{ nm} \dots 690 \text{ nm}$ .

Figure 5. Optimized profile to achieve a “strong” modulation for photonic SMP crystals capable of working in NIR. General view of the section (A) and detail (B). In this case, a modulation index of approximately 41% has been achieved.

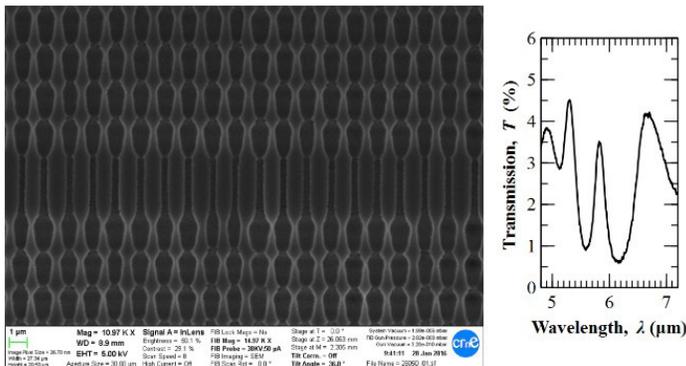


## 4.2 COMPLEX STRUCTURES IN 700NM PITCH MACROPOROUS SILICON

As EE allows freely changing the pore profile, advanced structures can be fabricated by using complex modulations schemes. For example, it is possible to create resonant cavities inside the MpS samples by changing one or several cycles of the profile at a certain depth. In this way, single and multiple resonators have been designed by tailoring the modulations of the pores (Cardador et al., 2017b). These cavities create reflection and transmission peaks in the spectral response of the samples. The use of multiple resonating cavities allows to either enhance a single resonance peak, or creating several, close, peaks at wavelengths of interest.

The primary application has been gas detection by NDIR technique (Hodgkinson & Tatam, 2013). For this, single peaks with high quality factor  $Q$  are better. Initially obtained results are shown in Figure 6, with a single cavity resonance, but not good enough for gas sensing. Later introducing more cavities, the peak  $Q$  increases as well as the bandgap is enlarged, achieving a better optical response, bringing a step forward for a suitable gas sensing device.

Figure 6. Sample of a MpS PhC with an embedded resonator and its effect in the transmission spectrum: a resonance peak that can be tuned to the absorption line of the target gas.



## 4.3 FROM SINGLE CAVITY TO MULTIPLE RESONANT CAVITIES

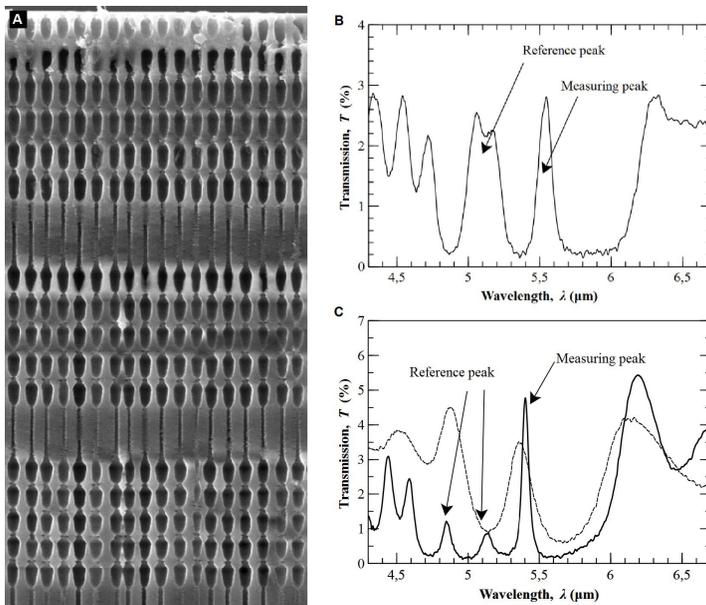
Single resonant cavity 700 nm structures have noticeable resonance peaks in the optical transmission at wavelengths in the margin of 5 to 7 microns, however of low  $Q$ -factor (around 25) with a transmission floor of about 1% inside the bandgap. To improve these results, sets of multiple coupling cavities have been studied by simulation. The added cavities resulted in the splitting of the resonance peak and a widening of the bandgap as evidenced in Figure 7. These structures were later fabricated and spectrally measured. Furthermore, adjusting the number of modulation period between

cavity defects, it is possible to help isolate the resonance peaks or enlarge the bandgap (Cardador et al., 2017a).

The obtained results show good correlation between simulation and measurement, revealing that we have been able to optimize the 700 nm EE fabrication. As seen in the results of Figure 7(b), the two cavity system is able to increase  $Q$  to about 75, while the 3 cavity structure (Figure 7(c)) achieves up to 175  $Q$ -factor. Jointly with a bandgap enlargement from 1.25  $\mu\text{m}$  (2 cavities) to 1.75  $\mu\text{m}$  (3 cavities), the MpS structures are now suitable for gas sensing use.

Furthermore, EE technology allows for more advanced structures, such as chirped modulated pore profile. These can offer improved peak isolation resulting in better sensing of the target gas.

Figure 7. SEM image for a two cavities photonic crystal (A). Transmission spectra, measured and simulated, for two (B) and three (C) cavities. (Cardador et al., 2017b)



## 5 500 NM PROCESS

In the case of the lower periodicity structures that we have fabricated, the pores are also arranged in a square lattice, but of 500 nm periodicity, and the pore diameter range from around 200 nm to 350 nm. The results show straight pores with good uniformity and controlled dimensions.

Though the EE fabrication process is a very flexible method of silicon micromachining (Trifonov et al., 2008), achieving the required process control for the

fabrication of ordered pore arrays whose sizes are between 200 nm and 350 nm, and with a separation of 500 nm is relatively complex (Laffite et al., 2011).

## 5.1 INITIAL PREPARATIONS. DIFFERENCES WITH OTHER PROCESSES

Before preparing samples it is necessary to determine the adequate substrate that result in stable pore growth. In particular, a more closely spaced pore network, whose diameters are expected to be of the order of 350 nm, leaves an inter-pore space of 150 nm. This makes necessary find the ideal resistivity of the substrate. It was decided that the same substrates as those used for the 700 nm MpS would continue to be used.

A second point to consider is an electrolyte with a different HF concentration. In order to be able to create modulations in a controlled manner, useful for PhCs, the etch speed is of great importance. Initially, a 2% HF solution was tested, with the idea of having a lower  $J_{PS}$  and a lower forward speed. In the end, due to stability issues, a 5% concentration was used.

## 5.2 SAMPLE PREPARATION

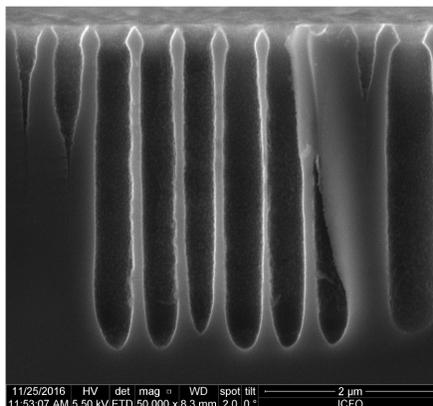
Samples for the 500 nm process were prepared following the same basic procedure as before: define the pattern of nucleation points using NIL lithography, transfer the pattern to the substrate, and creating said points later using an anisotropic attack of silicon (TMAH.)

Though the EE parameters need to be optimized for each case, samples of good quality were already obtained by using wafers of the same type and resistivity as for the 0.7 micron process: HF concentration 5% wt., *n*-type substrate with (100) orientation, and suitable resistivity.

## 5.3 STRAIGHT PORES OF 500NM PITCH

Initially, pores up to approximately 5  $\mu\text{m}$  in depth were fabricated. The etch time was approximately 7 minutes, giving an etch speed of approximately 0.7  $\mu\text{m}/\text{min}$ . Under low current conditions, pore death (premature pore termination) was high, as seen in Figure 8. Currents, as well as voltages, were tuned and optimized to obtain stable pore growth, which resulted in samples with little, but still some, pore death. No branching was observed using the selected etching conditions, suggesting that the voltage range used was adequate for the silicon substrates used. Evolution of microporous silicon is observed in the pore walls.

Figure 8. Straight pores in a 500 nm MpS structure. Etch conditions (low current) are the cause of the premature death of a significant number of pores.



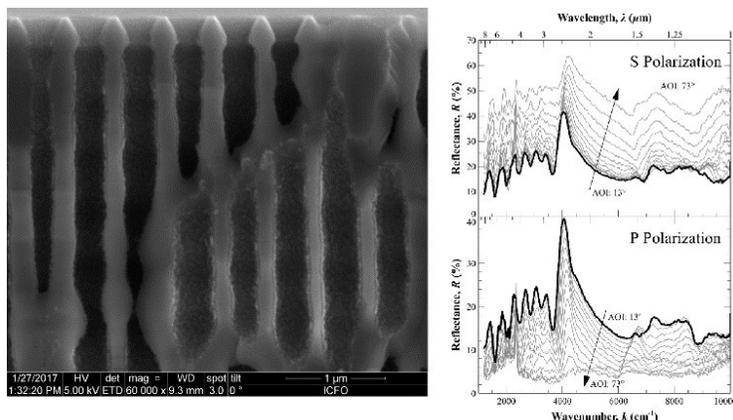
#### 5.4 MODULATED PORES (500NM PITCH)

MpS crystals with modulated pore profiles were obtained once the etching parameters were adjusted. Several profiles were tested, changing both the amplitude, period, and duty cycle. As a starting point, a square wave with rise and fall time approximately 1/6 of the period was used. The maximum porosity was 32.2%, while the minimum porosity was 24.6%. Given the substrate and electrolyte used, it was observed that pore growth control was limited, but enough to obtain a noticeable modulated structure.

An example of a fabricated sample is shown in Figure 9. It can be seen that stable pore growth, with modulation, has been achieved. As control of the pore growth is narrow, the current ratio from the “small” to “large” diameter regions is necessarily small, which results in a structure with a “smooth” modulation. The results obtained show that modulated pores with a diameter of less than 300 nm can be successfully achieved.

As the pore modulation amplitude is small, there is enough dielectric contrast to result in a characteristic optical behaviour that already approximates the desired responses in NIR, but with relatively poor definition (see Figure 9). In particular, the response obtained needs further improvement by achieving a higher modulation amplitude of the pores.

Figure 9. Sample of MpS modulated with the highest modulation amplitude at the time. The variation of the recorded profile is less than what the model predicted.



## 6 CONCLUSION

In this work, we describe the fabrication steps to achieve modulated MpS with *modulated pores* whose *diameters are less than 300 nm*, and we show the main characteristics of the obtained samples. As it is shown, stable pore growth with modulation is possible; however, work is still underway to tune the model to obtain strong modulation profiles. These results open up new possibilities for the creation of devices capable of operating in the range of optical communications, and for sensors (Shankar & Lončar, 2014; Wehrspohn et al., 2013), employing this technology. Furthermore, these structures may be used in other non-optical fields of application.

## REFERENCES

- Bru, D. V., Maza, D. C., & Martinez, A. R. (2017). Electrochemical Etching of silicon with sub-500 nm feature size. *2017 Spanish Conference on Electron Devices (CDE)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/CDE.2017.7905245>
- Cardador, D., Vega, D., Segura, D., & Rodríguez, A. (2017a). Macroporous silicon structures in 700 nm and 500 nm. *NanoSpain Conf 2017*. [https://www.nanospainconf.org/2017/Abstracts/Nanospain2017\\_Rodriguez\\_Angel\\_147.pdf](https://www.nanospainconf.org/2017/Abstracts/Nanospain2017_Rodriguez_Angel_147.pdf)
- Cardador, D., Vega, D., Segura, D., & Rodríguez, A. (2017b). Study of resonant modes in a 700nm pitch macroporous silicon photonic crystal. *Infrared Physics & Technology*, 80, 6–10. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2016.11.004>
- Cullis, A. G., Canham, L. T., & Calcott, P. D. J. (1997). The structural and luminescence properties of porous silicon. *Journal of Applied Physics*, 82(3), 909. <https://doi.org/10.1063/1.366536>
- Hodgkinson, J., & Tatam, R. P. (2013). Optical gas sensing: a review. *Measurement Science and Technology*, 24(1), 012004. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/24/1/012004>

Laffite, G., Roumanie, M., Gourgon, C., Perret, C., Boussey, J., & Kleimann, P. (2011). Formation of Submicrometer Pore Arrays by Electrochemical Etching of Silicon and Nanoimprint Lithography. *Journal of The Electrochemical Society*, 158(1), D10–D14. <https://doi.org/10.1149/1.3514584>

Lehmann, V. (1993). The Physics of Macropore Formation in Low Doped n-Type Silicon. *Journal of The Electrochemical Society*, 140, 2836. <https://doi.org/10.1149/1.2220919>

Lehmann, V. (1996). Porous silicon—a new material for MEMS. *Proceedings of Ninth International Workshop on Micro Electromechanical Systems*. <https://doi.org/10.1109/MEMSYS.1996.493820>

Lehmann, V., & Föll, H. (1990). Formation Mechanism and Properties of Electrochemically Etched Trenches in n-Type Silicon. *Journal of The Electrochemical Society*, 137(2), 653–659. <https://doi.org/10.1149/1.2086525>

Lehmann, V., & Rönnebeck, S. (2002). MEMS techniques applied to the fabrication of anti-scatter grids for X-ray imaging. *Sensors and Actuators A: Physical*, 95(2–3), 202–207. [https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(01\)00737-3](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(01)00737-3)

Levy-Clement, C., Lagoubi, A., Tenne, R., & Neumann-Spallart, M. (1992). Photoelectrochemical etching of silicon. *Electrochimica Acta*, 37(5), 877–888. [https://doi.org/10.1016/0013-4686\(92\)85039-N](https://doi.org/10.1016/0013-4686(92)85039-N)

López, E., Irigoyen, A., Trifonov, T., Rodríguez, A., & Llorca, J. (2010). A million-channel reformer on a fingertip: Moving down the scale in hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(8), 3472–3479. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.01.146>

Rodríguez, A., Molinero, D., Valera, E., Trifonov, T., Marsal, L. F., Pallarès, J., & Alcubilla, R. (2005). Fabrication of silicon oxide microneedles from macroporous silicon. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 109(1), 135–140. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2005.03.015>

Shankar, R., & Lončar, M. (2014). Silicon photonic devices for mid-infrared applications. *Nanophotonics*, 3(4–5), 329–341. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2013-0027>

Trifonov, T., Rodríguez, A., Marsal, L. F., Pallarès, J., & Alcubilla, R. (2008). Macroporous silicon: A versatile material for 3D structure fabrication. *Sensors and Actuators A: Physical*, 141(2), 662–669. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2007.09.001>

Vega, D., Martí, F., Rodríguez, A., & Trifonov, T. (2014). Macroporous silicon for spectroscopic CO<sub>2</sub> detection. *IEEE SENSORS 2014 Proceedings*, 1061–1064. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2014.6985187>

Wehrspohn, R. B., Schweizer, S. L., Gesemann, B., Pergande, D., Geppert, T. M., Moretton, S., & Lambrecht, A. (2013). Macroporous silicon and its application in sensing. *Comptes Rendus Chimie*, 16, 51–58. <https://doi.org/10.1016/j.crci.2012.05.011>

# CAPÍTULO 17

## PARTIAL REPLACEMENT OF SODIUM CHLORIDE BY POTASSIUM CHLORIDE IN GREEN TABLE OLIVES. LOOKING FOR A HEALTHY AND ECONOMIC ALTERNATIVE IN ARGENTINA

*Data de submissão: 13/01/2023*

*Data de aceite: 31/01/2023*

### **Mariela Beatriz Maldonado**

CONICET  
Universidad Tecnológica Nacional  
Facultad Regional Mendoza  
Departamento de Ingeniería Química  
Mendoza – Argentina  
ORCID 0000-0002-4188-8005

### **Leonel Lisanti**

Universidad Tecnológica Nacional  
Facultad Regional Mendoza  
Departamento de Ingeniería Química  
Mendoza – Argentina  
ORCID 0000-0002-8623-4953

### **Ariel Márquez**

Universidad Tecnológica Nacional  
Facultad Regional Mendoza  
Departamento de Ingeniería Química  
Mendoza – Argentina  
ORCID 0000-0003-2330-7905

### **Noemi Graciela Maldonado**

Universidad Tecnológica Nacional  
Facultad Regional Mendoza  
CeReDeTeC  
Mendoza – Argentina  
ORCID 0000-0001-6997-8080

### **Pablo Enrique Martín**

Universidad Tecnológica Nacional  
Facultad Regional Mendoza  
CeReDeTeC  
Mendoza – Argentina  
ORCID 0000-0001-9264-6228

### **Daniela Adriana Barrera**

Universidad Tecnológica Nacional  
Facultad Regional Mendoza  
CeReDeTeC  
Mendoza – Argentina  
ORCID 0000-0003-4907-4281

**ABSTRACT:** Seventy percent (70%) of the daily recommended amount of salt (Sodium Chloride) consumed is already included in the most common industrialized foods (bread, sausages, canned, frozen, cheese, soups and packaged food in general) because it is incorporated during the process of elaboration. The World Health Organization (WHO) recommends a daily intake of 5 g of salt of sodium. An excessive consumption of salt (sodium chloride) increases blood pressure and thus the risk of stroke, heart disease and nephropathy. It also causes recurrent renal lithiasis, it is a probable procarcinogen of gastric cancer, and it also participates in the pathophysiological bases of osteoporosis, obesity, cardiovascular diseases not dependent on blood pressure. According to the Ministry of Health of Argentina, it is consumed more than

twice the recommended salt. To reduce risks, one of the alternatives is to replace sodium in foods. One example is the use of potassium chloride, which achieves greater synergy when mixed in the appropriate percentage with sodium chloride, thus achieving low levels of sodium in the food. To accomplish that, sized Arauco variety olives were used, previously debittered, fermented and washed until no sodium was present. They were placed in new brines where NaCl was replaced with 10, 20 and 30% of KCl of the total NaCl (control). Two 'affective' tests were used: measurement of the degree of satisfaction and preference test. The concentration of Na and K ions were mathematically modeled.

**KEYWORDS:** Potassium chloride. Olives. Functional foods. Mathematical modeling.

## REEMPLAZO PARCIAL DE CLORURO DE SODIO POR CLORURO DE POTASIO EN ACEITUNAS VERDES DE MESA. EN BUSCA DE UNA ALTERNATIVA SALUDABLE Y ECONÓMICA EN ARGENTINA

**RESUMEN:** El setenta por ciento (70%) de la cantidad diaria recomendada de sal (cloruro de sodio) consumido ya está incluido en los alimentos industrializados más comunes (pan, embutidos, enlatados, congelados, quesos, sopas y alimentos envasados en general) porque se incorpora durante el proceso de elaboración. La Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda una ingesta diaria de 5 g de sal de sodio. Un consumo excesivo de sal (cloruro de sodio) aumenta la presión arterial y por lo tanto, el riesgo de accidente cerebrovascular, enfermedad cardíaca y nefropatía. El exceso de sal puede causar litiasis renal, es un probable procarcinógeno del cáncer gástrico, y participa en las bases fisiopatológicas de la osteoporosis, obesidad, enfermedades cardiovasculares, y en otras enfermedades no dependientes de la presión arterial. Según el Ministerio de Salud, en Argentina, se consume más del doble de la sal recomendada. Para reducir los riesgos, una de las alternativas es reemplazar el sodio en los alimentos. Un ejemplo es el uso de cloruro de potasio, que logra una mayor sinergia cuando se mezcla en un porcentaje con cloruro de sodio, logrando así niveles bajos de sodio en la comida. Con este objetivo se utilizaron aceitunas calibre variedad Arauco, previamente desamarizadas, fermentadas y lavadas hasta que no haya sodio presente y luego se colocaron en salmueras de potasio. Las aceitunas fueron colocadas en salmueras nuevas donde se reemplazó NaCl por 10, 20 y 30% de KCl del total de NaCl (control). Se utilizaron dos pruebas 'afectivas' para la medición del grado de satisfacción y prueba de preferencia. Por otra parte, la concentración de iones de Na y K fue modelada matemáticamente.

**PALABRAS CLAVES:** Cloruro de potasio. Aceitunas. Alimentos funcionales. Modelación matemática.

## INTRODUCTION

Dietary salt intake plays a critical role in regulating blood pressure. There is evidence from the epidemiological studies (ICRG,1988), migration studies (Poulter et al., 1990), population-based intervention studies (Forte,1989), treatments trials, and genetic studies (Lifton, 1996) that dietary salt is a causal factor for the raised blood pressure and the current high salt intake is largely responsible for the rise in blood pressure with the age.

Raised blood pressure is the major cause of cardiovascular disease, accounting for 62% of strokes and 49% of coronary heart disease (WHO, 2002). In addition, accumulating evidence shows that a high salt intake could independently predict left ventricular hypertrophy, although this remains controversial (WHO, 2004). A policy statement from the Panel of Experts of the Pan American Health Organization (PAHO) established (2020) as the expected date for compliance with this recommendation in the Region of the Americas (Campbell, 2012). For its part, in Argentina; In December 2013, Law 26,905 was promulgated and sanctioned, whose main objective is to promote the reduction of the consumption of Sodium in the population, and also to determine guidelines for the development of sanitary policies that lead to the promotion of healthy habits. This is fixed, the maximum sodium levels to be contained in certain food groups, and the adaptation periods to which manufacturers must adjust. It is known that, 70% of the recommended daily allowance of salt (Sodium Chloride) consumed is already included in the most common industrialized foods (bread, sausages, canned, frozen, cheese, broth, soups and packaged in general) because it is incorporated during the same process of elaboration. To reduce risks, one of the alternatives is to replace sodium in food. One example is the use of potassium chloride, which achieves greater synergy when mixed in the proper percentage with sodium chloride. The key is to arrive at a perfect combination for the consumer to accept. NaCl plays an important role in table olive processing affecting the flavour and microbiological stability but apparently, NaCl may be substituted of salt mixture in the fermentations (Bautista et al., 2010). In Argentina it is still not usual to ferment with these mixtures and generally an important remnant of fermented olives is kept at the end of the season. It is a custom to add more NaCl and other preservatives. Then the final destination of these olives are used in pizzas and sale to the public. Sometimes, they are not palatable because of the excess of salt. Taking into account these data, the objective of this research was based on the transformation of formulation of green table olives conservation, which are fermented with different concentrations of NaCl. To reduce sodium levels of the product were used mixtures of NaCl and KCl, and finally to achieve higher value to the final product.

## 2 MATERIALS AND METHODS

The treatments trials were based on transformation of fermented green olives with NaCl, Arauco variety; in olives without sodium first. They were subjected to several washes with deionized water for 24 hours: two washes of 8 hours each, the third of 6 hours and the last of 4 hours: in order to desalinate as much as possible, until the lowest

sodium level (0,71 ppm of Na). The olives used for the test were of uniform size, of average size: weight: 579 mg; diameter: 193 mm; length: 210 mm.

Four triplicate trials of different concentrations of NaCl (sodium chloride) and KCl (potassium chloride) were carried out. It is important to mention that the formulations were made using water of typical Mendoza region (rich in Ca<sup>+2</sup> and Mg<sup>+2</sup>). The first one consists of 100% NaCl, or “control treatment”. The second is replaced by 10% of the total of NaCl by KCl. The thirdly is composed by 80% NaCl and 20% KCl. The last one: 70% NaCl and 30% KCl. 7-liter containers were used and 4.5 kg of olives were placed, then completed with 3 liters of brine prepared with the different formulations up to a concentration of 8.5% brine. After that, it was added: 0.3% of HCl; 3.6 g of benzoic acid and 5.4 g of sorbic acid. The trials were controlled for almost two months. It was measured the pH measured with a peach-meter (Denver model BHR-I), acidity [9] and several sampling of brine were taken to measure sodium and potassium in a flame photometer Metrolab model 315.

## 2.1 TEST OF SENSORIAL ANALYSIS

In agreement with Anzaldúa - Morales (1994) two types of “affective” tests were used for sensory evaluation: Preference test and Proof of acceptance. In the first test the judges were asked which of the coded samples preferred and why even if they were not sure. Each judge evaluated each sample only once. The proof of acceptance consisted in a structured 5-point hedonic scale: Dislikes me a lot (-2); I dislike (-1); I do not like it or dislike it (0); I like (1) and I really like (2) On this scale, he was allowed to assign a category to more than one sample. The tests were carried out in the tasting room of Don Bosco Faculty. The finished products were analyzed by 50 randomly selected untrained males and females judges, from 24 to 60 years old, including non-consumers, eventual consumers and consumers of this fruit. Each judge was given a sample, of each of the treatments in the corresponding containers, arranged in a horizontal line at random. Each container contained 2 olives of each treatment.

## 2.2 MATHEMATICAL MODELING

Based on the shape of the experimental curves measured in the laboratory, it was proposed as model of the variation of the concentration in brine C (t) in relation to the time:

$$C(t) = c(\infty) + \frac{C_0 - c(\infty)}{1 + b \cdot t} \quad (1)$$

c (∞) is the value of the final concentration when the fruit is saturated, or when the submerged time tends to infinite.

$C_0$  represents the value of the initial concentration when the fruit is submerged.

In order to determine  $b$ , an intermediate value of the concentration  $C_2$  ( $t_2$ ) must be taken at a given time  $t_2$ , and the value of  $b$  is cleared from the equation:

$$C(t) = C_2 = C(\infty) + \frac{C_0 - C(\infty)}{1 + b \cdot t_2} \quad (2)$$

Clearing:

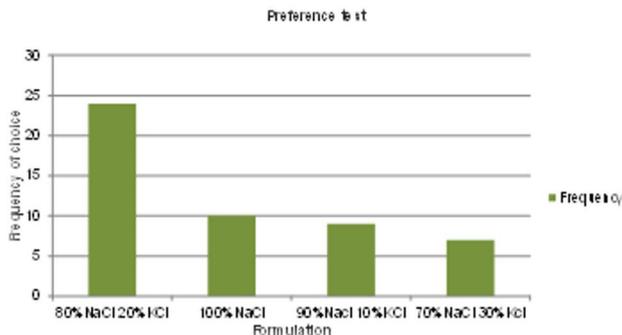
$$b = \frac{[(C_0 - C(\infty))/(C_2 - C(\infty))]}{t_2} - 1 \quad (3)$$

It should be clear that the value of  $C_2$  is measured for a later time  $t_2$  as the olives were submerged. For the studied, the value of the concentration was taken 16 later at the beginning of the experiment.

### 3 RESULTS

It can be observed in Figure 1, that the highest preference was for the formulation: 20% of KCl and 80% of NaCl. This represented a preference of 48%, followed by the Control composed by 100% of NaCl which represented a preference of 20%. Thirdly on the formulation: 30% KCl and 70% NaCl with 16% of preference. And finally the formulation: 10% of KCl and 90% of NaCl which represented a preference of 15%.

Figure1: Test of preference.



#### 3.1 MATHEMATICAL MODELING

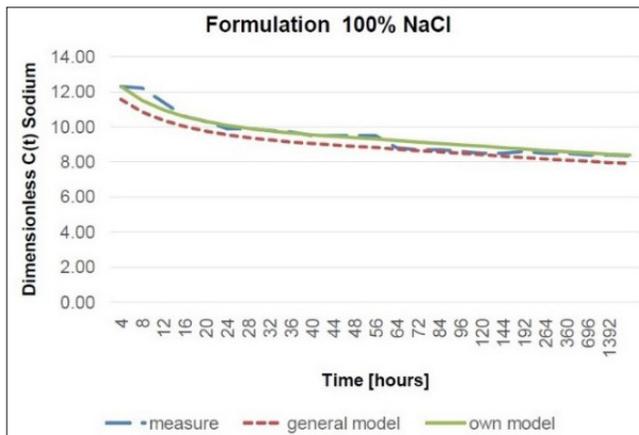
Two models were established: The own model is the model applied to each particular situation, with the own data of initial and final concentrations, and the corresponding one at 16 hours. The general model is the one that tries to integrate all the data using the boundary conditions the initial average data until the final data inclusive. The parameters used by the model were showed in the following Table.

Table1: Parameters used by the own model.

<b>Co</b>	<b>C1</b>	<b>b</b>	<b>t2</b>
1.39	0.36	0.0125	16
3.25	1.1	0.109375	16
5	1.95	0.19140625	16
<b>average</b>			
<b>3.21</b>	<b>1.14</b>	<b>0.10</b>	<b>16.00</b>

The model fitted very well for both ions that are chemically very similar in characteristics by their location in the periodic table. Their salts form electrolytic solutions in aqueous solution and have similar properties. The mathematical model allowed to predict the behavior of the concentration in the time once the solution has been saturated from the 16 hours onwards. Both ions behaved in a similar way because the skin and the flesh of olives were permeabilized by the debittering process. Simply, the difference between them was in the concentration of the formulation used. It should be noted that the sodium concentration is always higher than that of potassium as can be seen in the following Figures.

Figure 2: Model of variation of sodium concentration over time. Formulation: 100% NaCl.



It can be observed in Figures 2 and 3 that shows the control formulation: 100% NaCl that the measured sodium data fitted perfectly with both models, which does not happen so well for potassium ion. Low concentration could be occurs given in the formulation and maybe the flesh of the olive too. Potassium adjusted perfectly to the own model once it passed the 40 hours approximately. From there, both models were adjusted to the experimental data with great accurately.

Figure 3: Model of variation of Potassium concentration over time. Formulation: 100% NaCl.

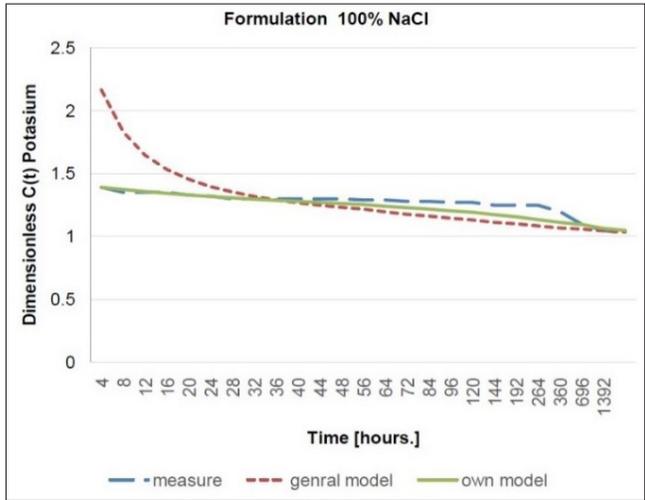


Figure 4: Model of variation of sodium concentration over time. Formulation: 80% NaCl 20%KCl.

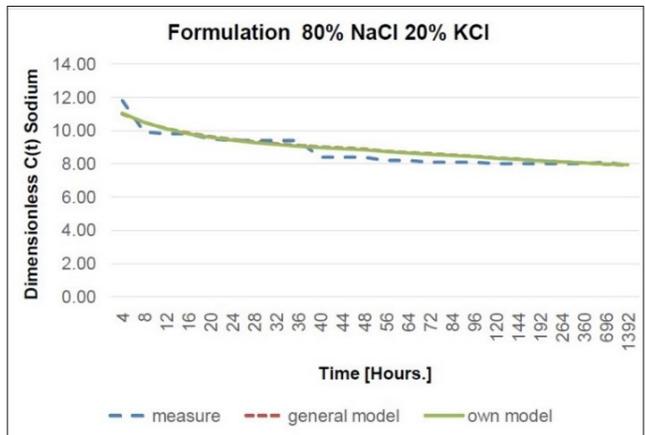
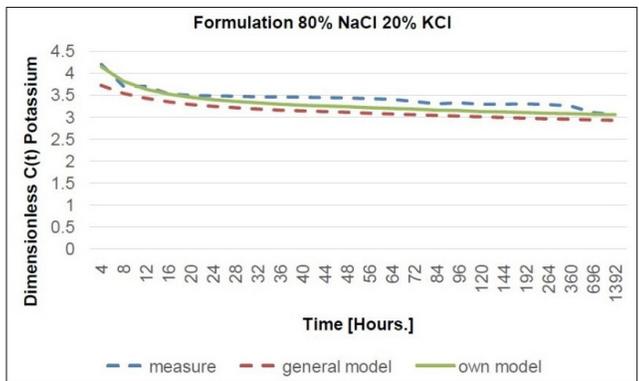


Figure 5: Model of variation of Potassium concentration over time. Formulation: 80% NaCl 20% KCl.



It can be seen from Figures 4 and 5 that as the formulation KCl concentration increased, the adjustment of the measured data behaved more closely for the both ions. This is consistent with the own model itself and the general model presented by Excel on average data. The same behavior was observed for sodium and potassium. This was verified in all formulations where the potassium content was increased (data not shown) but showed an excellent fit. This allows the own model to predict the behavior of the concentration of the ions over time, once washed solution saturated, after 16 hours. In all cases the ions concentration measured in the brine decreased in the time. Possibly this would indicate that the greater diffusion of sodium and potassium to the interior of the fruit happened during firsts hours, because the flesh and skin of the olive was already permeabilized by the debittering process.

Probably these two ions would diffuse, if we continued investigating, very similar, in spite of having a differential diffusion like almost all substances: size, affinity, other properties and type of behavior in the olives matrix. The only fact because of that varies in this trial is the concentration existing in the formulation. In the olives, the concentration of potassium is higher than sodium, but the processing of green olives incorporates more sodium by the debittering with lye and after that, when they are placed in brine, in general.

## 4 CONCLUSIONS

The formulation preferred by untrained consumers was 80% NaCl 20 % de ClK. It had a preference of 48%, versus the control composed by 100% of NaCl with 20% of preference.

The synergy of the two salts in the preservation of olives made the product organoleptically accepted by the panelists in the tasting.

It was also concluded that potassium chloride does not affect the conservation of olives.

It was possible to decrease the concentration of Sodium in such a way that the taster failed to notice the presence of the ions Potassium in the product.

This formulation is desirable for a healthier lifestyle; with respect to eating habits. Potassium chloride is more expensive than sodium chloride. But the risk of affecting health is even more expensive when measuring long-term consequences: costly medical treatment and risk of stroke or other pathologies. For this reason, the formulation found is more palatable and it is very important for the elaboration of a functional product.

This simple process increased the value added to the final product.

The own model fitted perfectly to the measured data, after the solution of the brine was saturated at 16 hours. This model allows predicting the behavior of ion concentration once passed the saturation.

## REFERENCES

ANZALDÚA, Antonio. **La evaluación sensorial de los alimentos en la teoría y la práctica**. [S. l.]: Editorial Acribia, 1994. 214 p. ISBN 978-84-200-0767-0.

BAUTISTA, J; ARROYO, F. N.; DURAN, M. C.; GARRIDO, A. Fermentation profiles of Manzanilla-Aloreña cracked green table olives in different chloride salt mixtures. **Food Microbiology**, [s. l.], v. 27, p. 403-412, 2010. DOI <https://doi.org/10.1016/j.fm.2009.11.015>. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0740002009002731?via%3Dihub>. Acceso en: 9 jan. 2023.

CAMPBELL, N. R. C.; CORREA, Ricardo; LEGOWSKI, Barbara; LEGETIC, Branka. Iniciativas para reducir la sal alimentaria en la Región de las Américas. **Revista Panamericana de Salud Pública**, [s. l.], v. 32, n. 4, p. 255-256, 2012. Disponible en: <https://iris.paho.org/handle/10665.2/9261>. Acceso en: 9 jan. 2023.

FORTE, J. G.; MIGUEL, J. M.; MIGUEL, M. J.; DE PÁDUA, F; ROSE, G. Salt and blood pressure: A community trial. **Journal of Human Hypertension**, [s. l.], v. 3, p. 179-184, 1989.

ICRG: INTERSALT COOPERATIVE RESEARCH GROUP. Intersalt: an international study of electrolyte excretion and blood pressure: Results for 24 hour urinary sodium and potassium excretion. **British Medical Journal**, [s. l.], v. 297, p. 319-328, 1988. DOI <https://doi.org/10.1136/bmj.297.6644.319>. Disponible en: <https://www.bmj.com/content/297/6644/319>. Acceso en: 9 jan. 2023.

LIFTON, R. P. Molecular genetics of human blood pressure variation. **Science**, [s. l.], v. 272, n. 5262, p. 676-680, 1996. DOI <https://doi.org/10.1126/science.272.5262.676>. Disponible en: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.272.5262.676>. Acceso en: 9 jan. 2023.

POULTER, N. R.; KHAW, K. T.; HOPWOOD, B. E.; MUGAMBI, M; PEART, W. S.; ROSE, G; SEVER, P. S. The Kenyan Luo migration study: observations on the initiation of a rise in blood pressure. **British Medical Journal**, [s. l.], v. 300, p. 967-72, 1990. DOI <https://doi.org/10.1136/bmj.300.6730.967>. Disponible en: <https://www.bmj.com/content/300/6730/967>. Acceso en: 9 jan. 2023.

THE WORLD HEALTH. Food and health in Europe: a new basis for action. **World Health Report**, Switzerland, n. 96, 2004. Disponible en: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/272255>. Acceso en: 9 jan. 2023.

THE WORLD HEALTH. The world health report 2002 : Reducing Risks, Promoting Healthy Life. **World Health Report**, Switzerland, 2002. Disponible en: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/67454>. Acceso en: 9 jan. 2023.

## ENSAYOS DE PUESTA A PUNTO PARA ESTUDIOS DE DIFUSIÓN DE ARSÉNICO EN *DAUCUS CAROTA*

Data de submissão: 11/01/2023

Data de aceite: 30/01/2023

### Oscar Daniel Galvez

Universidad Tecnológica Nacional  
Facultad Regional Mendoza  
Departamento de Materias Básicas  
Mendoza – Argentina  
ORCID 0000-0003-4427-3994

### Mariela Beatriz Maldonado

CONICET  
Universidad Tecnológica Nacional  
Facultad Regional Mendoza  
Departamento de Ingeniería Química  
Mendoza – Argentina  
ORCID 0000-0002-4188-8005

**RESUMEN:** La propuesta a desarrollar en el presente trabajo es parte de una investigación sobre fenómeno de difusión de arsénico en *Daucus carota*. A partir de un cultivo varietal predominante en la Provincia de Mendoza se hizo una selección de ese varietal en función de su forma, longitud, y diámetro superior. Se realizaron ensayos sobre el tiempo de cocción de las muestras tomando como indicador un grado de ternura entre 2 a 4 kgcm<sup>-2</sup>, donde ese valor se alcanzó a los 30 minutos a una temperatura de cocción de 98°C, también se

estudió la forma de obtención de sub-muestras para realizar el pre-tratamiento ácido, previo a la cuantificación de arsénico, para ello se ensayaron varias técnicas de mineralización por vía húmeda con distintas proporciones de mezclas de ácidos. La técnica de digestión ácida nítrico-clorhídrico resultó ser óptima para la matriz vegetal estudiada y por emplear menor cantidad de ácidos. Se verificó el fenómeno de difusión de arsénico en sub-muestras en experimento realizado a 98°C durante 40 minutos, existiendo concordancia entre los tenores de concentración de arsénico en función de la altura del corte y distancia radial.

**PALABRAS CLAVE:** Arsénico. Grado de ternura. Tiempo de cocción. Difusión. *Daucus carota*.

### SET-UP TESTS FOR ARSENIC DIFFUSION STUDIES IN *DAUCUS CAROTA*

**ABSTRACT:** The proposal to be developed in the present work is part of an investigation on the phenomenon of arsenic diffusion in *Daucus carota*. From a predominant varietal crop in the Province of Mendoza, a selection of that varietal was made based on its shape, length, and top diameter. Tests were carried out on the cooking time of the samples, taking as an indicator a degree of tenderness between 2 and 4 kgcm<sup>-2</sup>, where this value was reached after 30 minutes at a cooking temperature of 98°C. The method of obtaining sub-samples to

carry out the acid pretreatment, prior to the quantification of arsenic, was also studied. For this purpose, several wet mineralization techniques were tested with different proportions of acid mixtures. The nitric-hydrochloric acid digestion technique was optimal for the plant matrix studied and because it used fewer acids. The phenomenon of arsenic diffusion in sub-samples was verified in an experiment carried out at 98°C for 40 minutes, with agreement between the levels of arsenic concentration depending on the height of the cut and radial distance.

**KEYWORDS:** Arsenic. Degree of tenderness. Cooking time. Diffusion. *Daucus carota*.

## 1 INTRODUCCIÓN

La Organización Mundial de la Salud (OMS) redujo el valor de referencia del arsénico en agua potable de 50 a 10  $\mu\text{gL}^{-1}$ . Este nuevo valor tuvo en cuenta la alta toxicidad del arsénico por ser carcinogénico, y el desarrollo de nuevos métodos analíticos para su cuantificación (OMS, 2008; Smedley et. al., 2002).

A nivel mundial, varios países como Bangladesh, Chile, China, Hungría, India (Bengala Occidental), México, Rumanía, Taiwán, Vietnam y sur-oeste de EE.UU., han reportado concentraciones de arsénico superiores a 50  $\mu\text{gL}^{-1}$  en grandes acuíferos (Smedley et. al., 2002).

En Sudamérica, al menos cuatro millones de personas están en riesgo su salud al beber permanentemente agua con niveles de arsénico superior a lo establecido por la OMS (Swiecky et. al., 2006).

En Argentina, Obras Sanitarias de la Nación (1942), Trelles (1970) y Gavarotto (1988) hicieron relevamientos de aguas subterráneas con concentraciones máximas y mínimas de arsénico (Curto et. al., 2001).

En el Departamento de Lavalle, Provincia de Mendoza, se ha encontrado arsénico en agua subterránea con concentraciones variables que van desde 0,01  $\text{mgL}^{-1}$  al sur hasta 0,22  $\text{mgL}^{-1}$  al noreste y noroeste. Estudios hidroquímicos indicaron que el origen del arsénico proviene de cenizas volcánicas que se mezclan con sedimentos aluviales en las cuencas hidrográficas. En Lavalle, hay una comunidad indígena Huarpe donde ingieren solamente agua subterránea con un contenido de arsénico entre 30 y los 580  $\mu\text{gL}^{-1}$ . También, en distrito San José de ese departamento, una escuela rural se abastece de agua de una perforación para consumo de la población escolar, con una concentración de arsénico de 180  $\mu\text{gL}^{-1}$  (Bocanegra et. al., 2002; Swiecky et. al., 2006).

De la superficie total cultivada de la Provincia de Mendoza, el 92% pertenecen a las variedades de polinización abierta; donde el 83% es de la variedad bienal Flakkee y un 9% a las variedades anuales o criollas; y el resto, 8% son variedades híbridas.

Se trabaja con el varietal tipo Flakkee; una variedad comercial no híbrida bienal; ya que representa el 50 % de los cultivares de zanahoria en Argentina (Alessandro et. al., 2011; Gaviola, 2013).

El mecanismo de la circulación de las sustancias tóxicas a través de membranas es una zona escasamente investigados (Deshpande, 2002).

La transferencia de solutos puede ocurrir debido a convección, difusión molecular o difusión en remolino (Schwartzberg et. al., 1982).

De las hortalizas que se consumen en Mendoza se eligió la zanahoria por ser de consumo masivo y práctica culinaria, la cual es el objeto de esta investigación.

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 SELECCIÓN DE LA MUESTRA

Se escogieron 18 zanahorias de la variedad Flakee.

### 2.2 CARACTERIZACIÓN FÍSICA

De la selección de la muestra se cuantificaron las variables: peso, volumen, longitud, diámetro y peso específico. Para el Peso se empleó balanza digital marca Ohaus modelo SP601, sensibilidad 0,1 g; Volumen se determinó por medio del desplazamiento de agua en una probeta; Diámetro y longitud se utilizó un calibre de 0-200 mm, marca Stronger, sensibilidad 0,02 mm; y el Peso específico se determinó analíticamente mediante la relación peso-volumen.

### 2.3 INDICADOR GRADO DE TERNEZA Y TIEMPO DE COCCIÓN

Se cocinaron las muestras a dos temperaturas constantes; 83°C y 98°C; empleando baño termostatzado.

Los tiempos de cocción de los vegetales se obtuvieron usando como indicador el grado de terneza, con mediciones de un penetrómetro de frutas marca Schwyz, modelo GY3, serie GY analógico, hasta lograr un valor entre 3,0 a 3,5 kg cm<sup>-2</sup>.

### 2.4 DIFUSIÓN DE ARSÉNICO EN *DAUCUS CAROTA*

Se colocó en una cacerola de 10 litros de capacidad, una zanahoria con 5 litros de solución de arsénico 100 ugL<sup>-1</sup>, se cocinó a 98°C durante 40 minutos.

## 2.5 OBTENCIÓN DE SUB-MUESTRAS

De las muestras vegetales se estudió la forma de obtener las sub-muestras para la determinación de arsénico total en función de la altura (longitud) y distancia radial de la muestra.

## 2.6 MINERALIZACIÓN POR VÍA HÚMEDA

Se trabajó con distintas técnicas de mineralización por vía húmeda.

## 2.7 DETERMINACIÓN DE ARSÉNICO TOTAL

Las mediciones de arsénico se hicieron con el método normalizado 3114.B, generación manual de hidruro/espectrometría de absorción atómica (Rice et. al., 2012).

# 3 RESULTADOS

## 3.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA

Se realizó un resumen estadístico de las variables peso, diámetro, longitud y peso específico, sobre 18 muestras vegetales. Para cada variable se calculó media ( $\bar{x}$ ), desviación estándar ( $\sigma$ ), mediana ( $\tilde{x}$ ), meda y simetría.

Se calculó la simetría según ecuación 1.

$$\frac{\bar{x} - \tilde{x}}{\sigma} * 100 \quad (1)$$

Se estableció el criterio de simetría: <10% simétrico y <20% asimétrico.

Para las medidas de diámetro se realizaron tres lecturas con un desfase de 120° cada de ellas, en tres sectores de la longitud total de la zanahoria: uno a 2 cm del tallo, el otro a 3 cm de la punta y el resto en la parte central. En Tabla 1 se resumen las distintas variables realizada en 18 muestras vegetales.

Tabla 1. Resumen estadístico de caracterización física en 18 muestras de zanahorias.

	Largo (cm)	Diámetro (cm)			Peso (g)	peso específico (gmL <sup>-1</sup> )
		superior	medio	inferior		
( $\bar{x}$ )	16,75	41,48	33,62	26,37	142,2	1,037
( $\sigma$ )	1,37	1,98	2,57	3,14	20,2	0,017
( $\tilde{x}$ )	16,85	41,07	33,90	26,27	143,4	1,032
meda		1,53				0,007
simetría	simétrico	asimétrico	simétrico	simétrico	simétrico	asimétrico

### 3.2 INDICADOR GRADO DE TERNEZA Y TIEMPO DE COCCIÓN

Se realizaron tres lecturas con un desfase de 120° cada de ellas, en tres sectores de la longitud total de la zanahoria: uno a 2 cm del tallo, el otro a 3 cm de la punta y el resto en la parte central. Las mediciones se realizaron sobre 17 y 15 muestras a las temperaturas de 83°C y 98°C respectivamente. Se calculó media ( $\bar{x}$ ), desviación estándar ( $\sigma$ ), mediana ( $\tilde{x}$ ), meda y simetría en los dos ensayos. En Tablas 2 y 3 se detallan los indicadores de grado de terneza para temperatura de 83°C y 98 °C respectivamente.

Tabla 2. Indicador de terneza para distintos tiempos a 83°C<sup>a</sup>.

Tiempo (minutos)	ubicación	( $\bar{x}$ )	( $\sigma$ )	( $\tilde{x}$ )	meda	simetría	Indicador terneza (kg cm <sup>-2</sup> )
60	superior	13,6	1,1	13,7		simétrico	13,6 ± 1,1
	medio	11,8	1,3	11,8		simétrico	11,8 ± 1,3
	inferior	10,0	1,5	10,1		simétrico	10,0 ± 1,5
120	superior	9,2	0,8	9,3		simétrico	9,2 ± 0,8
	medio	7,7	1,0	7,8		simétrico	7,7 ± 1,0
	inferior	6,4	1,2	6,7		simétrico	6,4 ± 1,2
180	superior	7,1	1,8	7,1		simétrico	7,1 ± 1,8
	medio	5,4	1,0	5,2	0,6	asimétrico	5,4 ± 0,6
	inferior	4,6	1,1	4,3	0,8	asimétrico	4,6 ± 0,8
240	superior	5,5	0,9	5,2	0,8	asimétrico	5,5 ± 0,8
	medio	4,4	0,8	4,6		simétrico	4,4 ± 0,8
	inferior	3,5	0,8	3,4		simétrico	3,5 ± 0,8

<sup>a</sup> Realizado sobre 17 muestras.

Tabla 3. Indicador de terneza para distintos tiempos a 98°C<sup>b</sup>.

Tiempo (minutos)	ubicación	( $\bar{x}$ )	( $\sigma$ )	( $\tilde{x}$ )	meda	simetría	Indicador terneza (kg cm <sup>-2</sup> )
10	superior	16,8	2,2	17,3		simétrico	16,8 ± 2,2
	medio	14,9	3,9	14,7		simétrico	14,9 ± 3,9
	inferior	11,1	4,2	10,6		simétrico	11,1 ± 4,2
20	superior	6,6	1,2	6,5		simétrico	6,6 ± 1,2
	medio	4,5		4,3	0,30	asimétrico	4,5 ± 0,3
	inferior	3,0	0,7	3,0		simétrico	3,0 ± 0,7
30	superior	3,7	0,8	3,7		simétrico	3,7 ± 0,8
	medio	2,8	0,6	2,8		simétrico	2,8 ± 0,6
	inferior	1,9	0,4	1,8		simétrico	1,9 ± 0,4
40	superior	3,6		3,4	0,40	asimétrico	3,6 ± 0,4
	medio	2,8	0,5	2,8		simétrico	2,8 ± 0,5
	inferior	1,9		1,8	0,20	asimétrico	1,9 ± 0,2

<sup>b</sup> Realizado sobre 15 muestras.

### 3.3 INDICADOR GRADO DE TERNEZA Y TIEMPO DE COCCIÓN

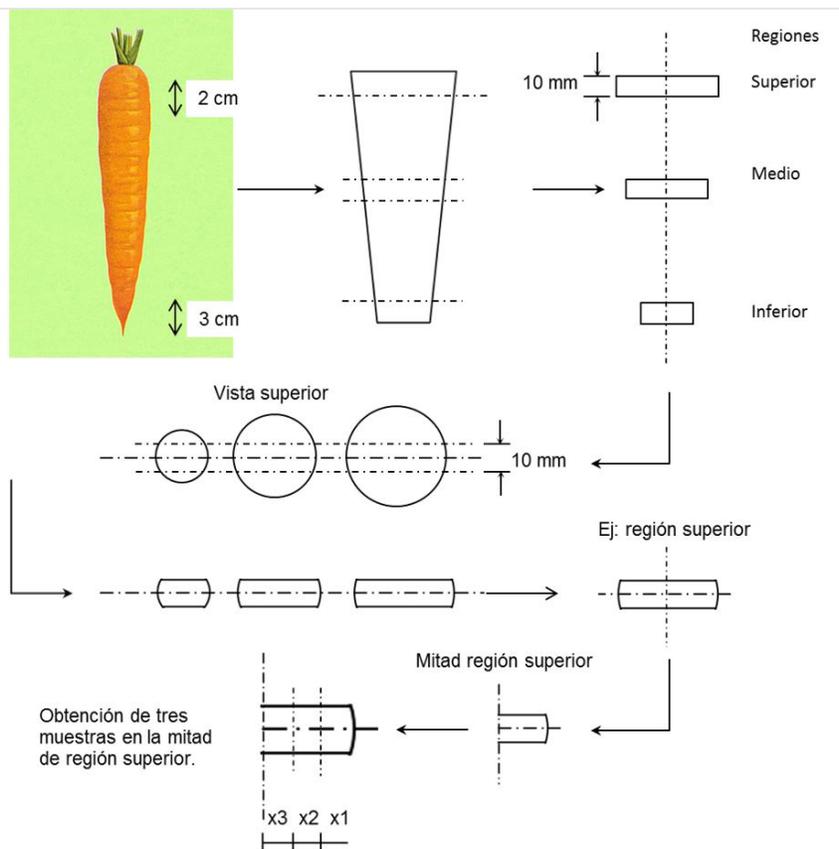
Se obtuvieron luego de una serie de cortes, con cada de ellos se obtuvo una porción de muestra hasta que la última porción resultante de muestra se la denomino sub-muestra. Por cada muestra de zanahoria se obtuvieron nueve sub-muestras discriminadas según se detalla en Tabla 4.

Tabla 4. Detalle de cada sub-muestra.

Región	Distancia radial		
superior	x1	x2	x3
medio	x1	x2	x3
inferior	x1	x2	x3

En Figura 1 se describe secuencia de obtención de sub- muestras a partir del corte superior. El mismo procedimiento se repite para sub-muestras de los cortes medio e inferior.

Figura 1. Secuencia de cortes para la obtención de muestras.



### 3.4 MINERALIZACIÓN POR VÍA HÚMEDA

Sobre distintas técnicas de mineralización por vía húmeda en distintas matrices de alimentos (Amonoo-Neizer et. al., 1993; Deshpande, 2002; Helrich, 1990; Islam et. al., 2012; Martínez et. al., 2012; Nielsen, 2010; Polo Puente, 2010; Rahman et. al., 2009; Rice et. al., 2012) se hicieron modificaciones de acuerdo a la matriz del material vegetal estudiado y disponibilidad de equipos.

Las técnicas de mineralización empleadas se enumeran en Tabla 5.

Tabla 5. Técnicas de mineralización modificadas por vía húmeda.

Ácidos	Relación	Temperatura (C°)	Tiempo (h)
Nítrico-sulfúrico	4:1	100	2
Nítrico-perclórico-sulfúrico	4:1:1	110	2
Nítrico-perclórico-sulfúrico	2:1:0,5	110	2
Nítrico-clorhídrico	1:1	90-95	2

### 3.5 DIFUSIÓN DE ARSÉNICO EN *DAUCUS CAROTA*

Se hizo un ensayo de puesta a punto para verificar el fenómeno de difusión en la muestra vegetal estudiada. Los valores de arsénico total en las sub-muestras de los cortes superior y medio se muestran en Tabla 6.

Tabla 6. Arsénico en *Daucus carota*<sup>a</sup>.

Muestra	Altura	Distancia radial	Peso sub-muestra (g)	As (ugL <sup>-1</sup> )	As (ug g <sup>-1</sup> )
1	medio	x1	0,236	47,90	10,15
2	medio	x2	0,296	41,12	6,95
3	medio	x3	0,706	20,98	1,49
4	superior	x1	0,315	16,01	2,54
5	superior	x2	0,236	11,16	2,36
6	superior	x3	0,693	7,97	0,58

<sup>a</sup> Ensayo a 98°C durante 40 minutos.

## 4 RESULTADOS

En el resumen estadístico de las tablas 1, 2 y 3 se observaron distribuciones asimétricas, esto pudo ser atribuido a la variabilidad de forma y tamaño del material vegetal. En Tabla 3, se observó que los valores objetivos de indicador de terneza; rango entre 3,0 y 3,5 kg cm<sup>-2</sup>; se alcanzaron a los 30 minutos, donde los mismos estuvieron dentro de los intervalos de confianza del 95%, a la temperatura de 98°C, en los tres sectores

superior, medio e inferior, siendo de  $3,7\pm 0,8$ ;  $2,8\pm 0,6$  y  $1,9\pm 0,4$  kg cm<sup>-2</sup> respectivamente. Análisis similar se hizo para el ensayo realizado a 83°C, datos en Tabla 2, donde en ningún intervalo de tiempo se logró llegar a los datos de terneza propuestos en las tres regiones superior, medio e inferior, excepto en la región inferior a los 240 minutos del ensayo. En la mineralización por vía húmeda de los tratamientos ensayados en Tabla 5, se optó por la digestión ácida nitro-sulfúrica. A cada recipiente digestor con la muestra se le agregó 2 mL de ácido nítrico y 1 mL de ácido sulfúrico y se llevó a temperatura por medio de plancha calefactora. Al principio de la técnica la solución ácida se tornaba de color negro, indicando presencia de materia orgánica, luego se agregó 2 mL ácido nítrico hasta ausencia de color negro y presencia de vapores blancos del ácido sulfúrico y ausencia de color en la solución ácida. Si la mineralización de una muestra demandaba más ácido nítrico se agregaba ácido sulfúrico para mantener la relación de ácidos.

Se cuantificó el fenómeno de difusión de arsénico en zanahoria a la temperatura de 98°C. Además, en las dos regiones; superior y medio se observaron comportamientos similares donde el contenido de arsénico descendió desde la periferia hacia el centro de la zanahoria, consistente con otros estudios del fenómeno de difusión con otros solutos en alimentos. También, en la región superior de la zanahoria, la muestra con una mayor distancia radial que las regiones medio e inferior; debido a la forma troncocónica de la misma; se demostró una relación inversa entre el grado de avance del arsénico en la zanahoria y la posición radial de la muestra.

Se descartaron las sub-muestras del corte inferior por un error operativo durante el procesamiento de las mismas. Para los próximos ensayos de acuerdo a los resultados obtenidos se propone extender tiempo de cocción en ensayo a 83°C hasta obtener los indicadores de terneza establecidos y continuar con los ensayos de difusión a 98°C y 83°C.

## REFERENCIAS

Alessandro, M. S., & Gabriel, E. L. (2011). El panorama varietal del cultivo de zanahoria en Argentina. *Horticultura Argentina*.

Amonoo-Neizer, E. H., & Amekor, E. J. E. H. P. (1993). Determination of total arsenic in environmental samples from Kumasi and Obuasi, Ghana. *101*(1), 46-49.

Bocanegra, O. C., Bocanegra, E. M., & Alvarez, A. A. (2002). *Arsénico en las aguas subterráneas: su impacto en la salud*. Paper presented at the Proceedings of the Congreso Internacional XXXII IAH y VI ALHSUD, Aguas Subterráneas y Desarrollo Humano.

Curto, S. I., Mendiburo, N. A., Plastina, R., & Boffi, R. J. A. G., Sociedad Argentina de Estudios Geográficos. (2001). Arsénico en acuíferos: influencia sobre la salud de la población. 21-22.

- Deshpande, S. (2002). *Handbook of food toxicology*: CRC Press.
- Gaviola, J. (2013). *Manual de producción de zanahoria* (Vol. 1). Buenos Aires: Ediciones INTA.
- Helrich, K. (1990). *Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists*: Association of official analytical chemists.
- Islam, M., Das, B., & Huque, M. J. J. o. S. R. (2012). Arsenic accumulation in common vegetables from irrigation. 4(3), 675-688.
- Martínez, G. C., Piccoli, A. B., Ortiz, M. L., & Schroeder, M. A. (2012). Comparación de procedimientos de oxidación de materia orgánica para la determinación de fósforo en material vegetal.
- Nielsen, S. (2010). *Food analysis*: Springer.
- OMS. (2008). Guidelines for Drinking-water Quality, Vol. 1, Recommendations.
- Polo Puente, M. P. (2010). *Análisis de la Concentración de Arsénico en Tres Alimentos Papas (Solanum tuberosum), Zanahoria (Daucus carota) y Leche Cruda Producidas en las Zonas Afectadas por el Volcán Tungurahua (Mocha-Quero)*.
- Rahman, F., Chen, Z., Naidu, R. J. E. G., & Health. (2009). A comparative study of the extractability of arsenic species from silverbeet and amaranth vegetables. 31(1), 103-113.
- Rice, E. W., Baird, R. B., Eaton, A. D., & Clesceri, L. S. (2012). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (Vol. 10): American public health association Washington, DC.
- Schwartzberg, H. G., & Chao, R. (1982). Solute diffusivities in leaching processes. *Food Technology*, 36(2), 73-86.
- Smedley, P. L., & Kinniburgh, D. (2002). A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied geochemistry*, 17(5), 517-568.
- Swiecky, C., Garcia, S., Villaamil Lepori, E., Paredes, G., Farías, S., Ponce, R., & Moreno, I. J. E. c. m. A. T. A. S. d. A. y. D. S. A. (2006). Epidemiología del hidroarsenicismo crónico regional endémico en la república argentina.

# CAPÍTULO 19

## TOXIC EFFECTS OF CONSTITUENTS OF THE FERN *STICHERUS QUADRIPARTITUS* AGAINST *SPODOPTERA* *FRUGIPERDA* AND *PLODIA INTERPUNCTELLA*

Data de submissão: 20/12/2022

Data de aceite: 17/01/2023

**Fernando Livio Corzo**

Departamento de Ciencias  
Básicas y Tecnológicas  
Universidad Nacional de Chilecito  
9 de Julio 22 (F5360CKB) Chilecito  
La Rioja- Argentina  
<https://orcid.org/0000-0002-8647-1254>

**Susana Beatriz Popich<sup>1</sup>**

Departamento de Ciencias  
Básicas y Tecnológicas  
Universidad Nacional de Chilecito  
(UNDeC)  
9 de Julio 22 (F5360CKB) Chilecito  
La Rioja- Argentina  
<https://orcid.org/0000-0002-4786-5285>

**ABSTRACT:** Secondary metabolites produced by plants can interact with insects which can affect at all levels of biological organization, but their action generally disturbs cellular tissues, and physiological processes, e.g., by hormonal regulation, neuronal signalization growth regulators, or reproduction in exposed individuals. A previous chemical investigation of a Patagonian collection of *Sticherus quadripartitus* (Gleicheniaceae)

<sup>1</sup> Corresponding Author.

yielded sesqui and diterpenoids that were now evaluated lethal effects of the methanolic extract and the five major diterpenoids for their effects against *Spodoptera frugiperda* Smith, (Lepidoptera: Noctuidae) and *Plodia interpunctella* Hübner (Lepidoptera: Pyralidae). In both species were larval and pupal mortality rates, larval nutritional effects as well as adult malformations were registered. Four of the five diterpenoids tested produced 65 to 90% mortality of larvae of *P. interpunctella* at 150 µg per gram of natural diet, with larval LD<sub>50</sub> ranging from 69.3 to 123.0 µg/g. Our results suggest that the combination of lethal and sublethal effects of sesqui-and diterpenoids may have important implications for the population dynamics of the *Plodia interpunctella*.

**KEYWORDS:** Diterpenoids. *Sticherus quadripartitus*. Lethal and sublethal effects. Lepidoptera.

EFFECTOS TÓXICOS DE LOS  
CONSTITUYENTES DEL HELECHO  
*STICHERUS QUADRIPARTITUS* CONTRA  
*SPODOPTERA FRUGIPERDA* Y *PLODIA*  
*INTERPUNCTELLA*

**RESUMO:** Os metabólitos secundários produzidos por plantas podem interagir com insetos que podem afetar todos os níveis de organização biológica. No entanto, a sua ação geralmente perturba só os tecidos celulares e os processos fisiológicos, como por exemplo, regulação hormonal, reguladores

de crescimento de sinalização neuronal ou reprodução em indivíduos expostos. Uma investigação química realizada a uma coleção patagônica de *Sticherus quadripartitus* (Gleicheniaceae) produziu sesqui e diterpenóides, onde foram agora avaliados efeitos letais do extrato metanólico e os cinco principais diterpenóides pelos seus efeitos contra *Spodoptera frugiperda* Smith (Lepidoptera: Noctuidae) e *Plodia interpunctella* Hübner (Lepidoptera: Pyralidae). Em ambas as espécies foram registadas taxas de mortalidade larval e pupal, efeitos nutricionais larvais, bem como malformações adultas. Quatro dos cinco diterpenóides testados produziram 65 a 90% de mortalidade de larvas de *P. interpunctella* a 150 µg por grama de dieta natural, com DL50 larval variando de 69,3 a 123,0 µg/g. Os nossos resultados sugerem que a combinação de efeitos letais e subletais de sesqui- e diterpenóides pode ter implicações importantes para a dinâmica populacional de *Plodia interpunctella*.

**PALAVRAS-CHAVE:** Diterpenóides. *Sticherus quadripartitus*. Efeitos letais e subletais. Lepidoptera.

## 1 INTRODUCTION

Synthetic insecticides have been widely developed and are extensively used because of their effectiveness; easy application and storage. Their frequent use has brought environmental disturbances, pest resistance, lethal effects on non-target organisms, and toxicity to users (Gill and Garg 2014; Rimoldi *et al.*, 2018). On the other hand, the use of environmentally friendly botanical insecticides has gained importance in recent years (Raghavendra *et al.*, 2016).

*Sticherus quadripartitus* (Poir.) Ching (= *Gleichenia quadripartite* Moore) is a bitter-tasting fern of the family Gleicheniaceae endemic to southern Argentina and Chile (Rodríguez *et al.*, 2018). Some species of Gleicheniaceae have been chemically investigated and many glycosylated labdanes and clerodanes have been described from them. These compounds display antifeedant effects on phytophagous insects (Klein Gebbinck *et al.*, 2002; Topçu and Gören 2007). A methanolic extract of *S. quadripartitus* furnished 15 diterpenoid glycosides that were structurally investigated by exhaustive use of spectroscopic methods and X-ray diffraction analysis (Socolsky *et al.*, 2007).

Many secondary metabolites from plants as terpenoids (Corzo *et al.*, 2012; Sosa *et al.*, 2019), steroids (Salgado Garciglia *et al.*, 2008) flavonoids (Su *et al.*, 2017) acetogenins among (Ruiz Hidalgo *et al.*, 2015), have shown to produce high mortality rates and sublethal effects at low concentrations on a number of insects (Ajaha *et al.*, 2019).

*Spodoptera frugiperda* Smith (Lepidoptera: Noctuidae) is a polyphagous insect who causes, in larval stages, severe damages in maize, soybean, beans, and cotton crops in South America (Silva *et al.*, 2017). *Plodia interpunctella* Hübner (Lepidoptera: Pyralidae) is a moth well adapted to storage. The larvae are able to penetrate and infest a wide

range of packaged foods and can economically affect the production of dry fruits, nuts, almonds, pistachios, and cereal grains (Mohandass *et al.*, 2007; Borzoui *et al.*, 2016).

Lethal effects of the methanolic extract and the five major diterpenoids of *Sticherus quadripartitus* (Gleicheniaceae) were evaluated on *S. frugiperda* and *P. interpunctella* when incorporated to the insect diets at different concentrations (150 - 50 µg/ g of diet). Larval and pupal mortality rates, larval nutritional effects as well as adult malformations were registered.

## 2 MATERIALS AND METHODS

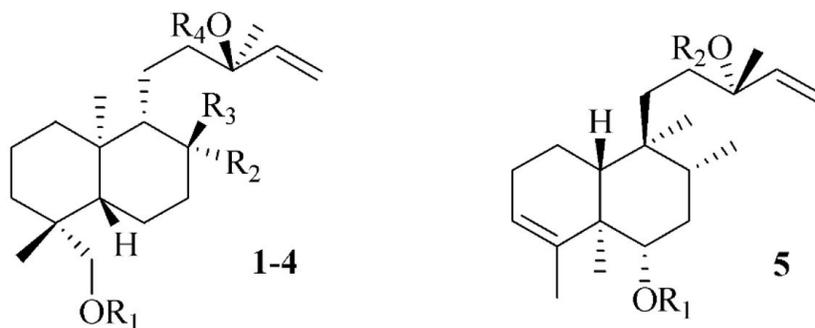
### 2.1 PLANT MATERIAL

Frond of *S. quadripartitus* were collected in Rio Negro, Argentina and a voucher specimen was deposited at Fundación Miguel Lillo, Tucumán, Argentina (LIL607333).

### 2.2 EXTRACTION AND PURIFICATION OF DITERPENOIDS

The air-dried fronds of *S. quadripartitus* were ground and extracted successively with Et<sub>2</sub>O and MeOH. A part of the MeOH extract was evaluated on its effects when added to the *S. frugiperda* larval diet. Diterpenoid glycosides were obtained from the MeOH extract by chromatographic procedures (Socolsky *et al.*, 2007) and the major pure compounds shown in Figure 1 were also evaluated on their effects on *S. frugiperda* and *P. interpunctella*.

Figure 1: Clerodane and labdane-type diterpenoid glycosides tested for their toxicity against *S. frugiperda* and *P. interpunctella*.



1- R1=H, R2=OH, R3=CH3, R4=β-glucopyranosyl.

2- R1=H, R2=OH, R3=CH3, R4=α-rhamnopyranosyl-[1→2]-β-quinovopyranosyl.

3- R1=α-rhamnopyranosyl, R2=OH, R3=CH3, R4=α-rhamnopyranosyl.

4- R1=α-rhamnopyranosyl, R2=OH, R3=CH3, R4=α-rhamnopyranosyl-[1→2]-β-quinovopyranosyl.

5- R1=β-quinovopyranosyl, R2=β-glucopyranosyl.

## 2.3 INSECTS

Larvae of *S. frugiperda* were obtained from the laboratory of Estación Experimental Obispo Colombres Tucumán, Argentina. Colonies were reared under controlled conditions of temperature ( $26\pm 1^{\circ}\text{C}$ ), relative humidity (60-70%), and photoperiod (L12:12D), during ten generations. Larvae fed on an artificial diet (Corzo *et al.*, 2012; Ruiz Hidalgo *et al.*, 2016).

Larvae of *P. interpunctella* were originally obtained from warehouses of small and medium farmers from Antinaco-Los Colorados valley, La Rioja province, Argentina ( $29^{\circ}10'00''\text{S}$ ,  $67^{\circ}30'00''\text{W}$ ). There were reared in our laboratory during six generations fed with chopped nuts and maintained at controlled conditions of temperature ( $25 \pm 1^{\circ}\text{C}$ ), relative humidity (60-65%), and photoperiod (16:8 h, L:D) Corzo *et al.*, 2020; Borzoui *et al.*, 2016.

## 2.4 SPODOPTERA FRUGIPERDA MORTALITY TEST

A portion of the artificial diet was impregnated with ethanol and, after solvent removal, was employed as a control diet. Another portion was treated with an ethanolic solution of the MeOH extract, in order to leave 1.000  $\mu\text{g}$  and 10.000  $\mu\text{g}$  per g of diet after solvent removal. A third portion of the diet was impregnated with ethanolic solutions of pure compounds in order to leave 50 and 100  $\mu\text{g}$  per g diet of each compound after solvent removal.

Portions of control and treated diets (5 g) were placed separately in test tubes (20 replicates for control and 20 for each treatment). Second stage larvae of homogeneous size were placed individually in each tube at the beginning of the experiment and kept in the tube until the emergency of adults. Test tubes were covered with a small piece of moistened cotton to prevent diet desiccation and then kept under rearing conditions (Corzo *et al.*, 2012; Ruiz Hidalgo *et al.*, 2016). Larval and pupal mortality, as well as adult malformations were recorded. Larvae were considered dead if they did not move when touched with a little brush for 30 seconds. Pupae were considered dead when desiccated or when the adults do not emerge after 14 days of the pupal period. An adult was considered malformed if abnormal legs and/or abdomen, and/or wings are clearly observed (Zarate *et al.*, 2010).

## 2.5 DETERMINATION OF GROWING ALTERATIONS AND DIET CONSUMPTION OF SPODOPTERA FRUGIPERDA LARVAE

Portions of accurately weighed control and treated diets were placed separately in test tubes (20 replicates for control and 20 for each treatment). Second stage larvae

were accurately weighed and placed individually in each tube. Test tubes were covered with a small piece of moistened cotton to prevent diet desiccation and then kept under rearing conditions for ten days. Every addition of diet with the corresponding weight was recorded as well as the larval weight at the end of the experiment (10 days).

In order to determine the larval weight gained per day, the following equation was used:

$$\mathbf{GR} = (A-B)/t$$

**GR**= Average daily weight gain during the experiment

**A**= final larval weight, **B**= initial larval weight, **t**= 10 days

The amount of diet consumed by larvae was also calculated for the same period like

$$\mathbf{CR} = D/t$$

**CR**= Average daily diet consumption during, **D**= total weight of food consumed,

**t**= 10 days

Then the larvae continued to feed on treated or control diets to pupate. Bioassays were checked at 24-h intervals until mortality occurred or adult emergency (Corzo *et al.*, 2012; Hidalgo *et al.*, 2016; Ramirez *et al.*, 2010).

## 2.6 BIOASSAYS ON *PLODIA INTERPUNCTELLA*

The diet of *P. interpunctella* was chopped nuts previously sterilized at -18 °C for one week, (Souza Aguiar *et al.*, 2003). A portion of the nuts was impregnated with ethanol (diet control); another three portions (50 g each) were impregnated with ethanol solutions of each pure compound in order to leave 50, 100 and 150 µg each per g diet. After impregnation of both diets (control and treated) solvent was completely removed *in vacuo*. Nutritional indexes were not determined for this species.

## 2.7 FEEDING TOXICITY ASSAY ON *P. INTERPUNCTELLA*

Known portions (50 g) of control and treated diets were placed in 500 mL Erlenmeyer flask and 20 second instar larvae were placed on the diet. Flasks were located in controlled conditions, until the emergence of 1<sup>st</sup> generation adults. Pupae were considered dead when observed desiccation in abdominal segments. The larval and pupal periods, the median lethal dose (LD<sub>50</sub>), mortality and deformed adults were recorded. An adult was considered deformed if it was unable to shed from the pupal exuviae, or if it did not have normal wings (Zarate *et al.*, 2010).

## 2.8 STATISTICAL ANALYSIS

Duration of the larval, pupal, and adult emergence stages was reported as Mean  $\pm$  SEM. Differences in mean values were evaluated by analysis of variance (ANOVA). The Tukey test was used for all pairwise multiple comparisons of groups. The  $P > 0.05$  was considered not significant. Probit analysis was carried out using the program MINITAB® release 14 in order to LD<sub>50</sub> for, and the median lethal time (LT<sub>50</sub>) only *S. frugiperda*, STATISTIX 7.1 (2000).

## 3 RESULTS

### 3.1 TOXICITY OF MEOH EXTRACT OF *S. QUADRIPARTITUS* ON *S. FRUGIPERDA*

The MeOH extract of *S. quadripartitus* added at 10.000  $\mu\text{g/g}$  of diet produced an increase in the length of the larval period of 50 % in relation to control, while the treatment at 1000  $\mu\text{g/g}$  caused no significant changes in the larval period. The larval mortality rises to 20 and 40% when the diet is treated with 1.000 and 10.000  $\mu\text{g/g}$  respectively, while a 10 and 30% pupal mortality is observed at same concentrations of the methanol extract of *S. quadripartitus*. The treatments produce 21.4 and 25% malformations in the adult wings at 1.000 and 10.000  $\mu\text{g/g}$  (Table 1).

Table 1. Duration life cycle of *S. frugiperda* larvae fed with MeOH extract of *S. quadripartitus* added to diet. \*Mean  $\pm$  SD followed by different letters within a column followed by the same letter are not significantly different ( $P > 0.05$ , Tukey multiple range test).Lp: larval period.

Data	Control	Treated (1000 $\mu\text{g/g}$ )	Treated (10000 $\mu\text{g/g}$ )
Lp[d]	16.7 $\pm$ 1.1a	19.0 $\pm$ 1.4a	25.5 $\pm$ 3.1b
Larval mortality (%)	5	20	35
Pupal mortality (%)	10	30	35
Adult malformation (%)	0	50	55

### 3.2 TOXICITY OF DITERPENOIDS OF *S. QUADRIPARTITUS* ON *S. FRUGIPERDA*

Pure diterpenoids incorporated into the diet at 100  $\mu\text{g/g}$  do not significantly affect the larval period but larval mortalities (10 to 45%) and pupal mortalities (35 to 65 %) are detected in the treatment at the same concentration. At 100  $\mu\text{g/g}$  all pure compounds produced mortality on the larval stage for *S. frugiperda*. In treated pupae by compounds **2**, **3** and **4** the major sublethal effects observed were desiccation of pupal abdominal segments that produced subsequent mortality. Adults who

survived treatment presented malformations in the wings and abdomen. At the lower concentration (50 µg/g), pupal mortality and adult malformation was reduced except for compounds **3** and **5** (Table 2).

Table 2. Toxicity diterpenoids *S. quadripartitus* on *S. frugiperda*. \*Pupae mortality includes deformed pupae and normal pupae that had not emerged after 14 days; combines total mortality during larval and pupal stages.

Compounds	Larval Duration (Days)	Larval mortality 100 µg/g (%)	Pupal mortality 100 µg/g	Larval mortality 50 µg/g (%)*	Pupal mortality 50 µg/g (%)
<b>Control</b>	22.9±3.0	15	5	5	0
<b>1</b>	20.3±2.9	25	35	15	5
<b>2</b>	22.8±2.4	25	50	10	10
<b>3</b>	22.5±2.0	10	65	25	0
<b>4</b>	19.3±2.0	25	65	20	0
<b>5</b>	22.5±2.5	45	50	25	0

### 3.3 NUTRITIONAL INDICES

As shown in Table 3, the only significant decrease (59.6%) in the growth rate of *S. frugiperda* larvae is produced by incorporation of the MeOH extract of *S. quadripartitus* at 10,000 µg/g. Both treatments (1,000 and 10,000 µg/g) produced a significant increment in the consumption rate in relation to control of 15,6 and 13 %, respectively.

A significant decrease (66.7%) in the efficiency of conversion of the consumed diet was observed when 10,000 µg/g of extract were incorporated into the larval diet.

Table 3: Values of Nutritional indices of *S. frugiperda* fed diet added MeOH extract on *S. quadripartitus* \*Mean ± SD followed by different letters within a column followed by the same letter are not significantly different ( $P > 0.05$ , Tukey multiple range test)

Compounds	GR* mg/d	CR*	EDC*
Control	5.20 ± 1.92a	41.06±2.98a	0.12 ± 0.04a
MeOH extract 1,000 µg/g	4.76 ± 1.82a	47.58 ± 2.35b	0.09 ± 0.03b
MeOH extract 10,000 µg/g	2.10 ± 0.69b	46.39 ± 1.54b	0.04 ± 0.01b

### 3.4 TREATMENT OF PURE COMPOUNDS ADDED TO THE DIET ON *PLODIA INTERPUNCTELLA*

The compounds showed a clear dose-dependent toxicity when probed against *P. interpunctella*. The highest percentage mortality larval was produced by glycosides diterpenoids **3** and **4** at 150 µg/g. Malformed adults are generated at 100 µg/g by 2, 3 and 4 compounds. At the same concentration the compounds 2, 3, 4 and 5 produce larval mortality superior at 35%. Larval and pupal duration have no significant differences in all concentrations (Table 3).

Table 4. Alterations in life cycle in days, mortality percentage and malformations on *S. frugiperda* fed with diet added pure compounds of *S. quadripartitus* \*Mean ± SD followed by different letters within a column followed by the same letter are not significantly different ( $P > 0.05$ , Tukey multiple range test). Duration larval (LD), Pupal duration (PD) in days, Larval mortality( LM), Pupal mortality (PM), Malformed adults (MFA).

Compounds	LD (d)	PD(d)	(%)	(%)	MFA	LD (d)	PD (d)	(%)	(%)	MFA	LD (d)	PD (d)	(%)	(%)	MFA
	150µg/g	150 µg/g	LM	PM	150	100	100	LM	PM	100	50	50	LM	PM	50
			150	150	µg/g	µg/g	µg/g	100	100	µg/g	µg/g	µg/g	50	50	µg/g
			µg/g	µg/g				µg/g	µg/g				µg/g	µg/g	
<b>Control</b>	12.4± 1.8a	11.4 ± 1.8a	10	0	0	12.8 ± 2.1a	11.4 ± 1.1a	5	5	0	13.4 ± 2.7a	9.5 ± 1.5a	10	5	0
<b>1</b>	10.7±1.5a	11.3 ± 2.3a	65	5	0	11.7 ± 2.2a	11.2 ± 1.9a	35	15	0	13.9 ± 2.1a	9.3 ± 1.6a	20	10	0
<b>2</b>	11.6±2.1a	11.6 ± 1.1a	75	0	0	12.7 ± 2.8a	10.6 ± 1.4a	40	5	9.1	-	-	-	-	-
<b>3</b>	12.0±1.4a	9.5 ± 0.7a	90	0	0	12.2 ± 2.6a	9.5 ± 1.7a	80	0	25	14.1 ± 3.2a	9.6 ± 1.1a	30	10	8.3
<b>4</b>	13.5±2.2a	10.0 ± 1.4a	90	0	0	13.4 ± 2.3a	9.8 ± 1.2a	65	0	28.6	13.6 ± 2.1a	9.3 ± 1.1a	40	5	0
<b>5</b>	10.8±1.8a	9.8 ± 1.3a	75	0	0	12.1 ± 1.5a	10.1 ± 1.4a	55	5	0	14.5 ± 3.0a	10.6 ± 1.8a	25	20	18.2

The values based on LD<sub>50</sub>, the effects toxicity of compounds evaluated ranging from 69.3 to 123.0 µg/g obtained of *S. quadripartitus* against *P. interpunctella*, with clear overlapping between confidence intervals. The compounds **3** and **4** showed the most aggressiveness (Table 5).

Table 5. Median Lethal Concentration (LD<sub>50</sub>) at 24h after *P. interpunctella* were exposed with diterpenoids incorporated in the larval diet of (n= 20). <sup>a</sup>CI<sub>95</sub>: confidence intervals 95%, d: day.

Compounds	LD <sub>50</sub> (CI <sub>95</sub> ) <sup>a</sup> [µg/g]
Control	-
<b>1</b>	*123.0 (95.2-184.0)
<b>2</b>	70.8 (38.8;90.0)
<b>3</b>	69.3 (20.6-92.5)
<b>4</b>	96.5 (62.7-126.6)
<b>5</b>	119.0 (103.5-136.8)

<sup>a</sup>CI<sub>95</sub>: confidence intervals 95%, d: day

## 4 DISCUSSION

From *S. quadripartitus* were isolated and identified diterpenes, clerodanes and labdane-type. Coll and Tandron (2005) as well as Gonzalez- Coloma *et al.* (2005) demonstrated that clerodans obtained from *Teucrium nudicaule* H., exerted a strong effect on *Spodoptera littoralis*, rated by larval consumption and growth on a dry weight basis. These later authors also demonstrated that clerodans reduced biomass gains without decreasing food consumption. Results similar to those obtained in the present work (Table 1). The mortality observed in this study, was similar to that obtained by Kumari *et al.*, 2003; Abbaszadeh *et al.*, 2014 and who worked with clerodane diterpenoids isolated of *Clerodendron infortunatum* on larvae of the polyphagous lepidopteran *Helicoverpa armigera*. Also, Hernandez and Gamboa-Angulo (2019) had similar results for the species *Plutella xylostella*.

In reference to the species *Plodia interpunctella*, another polyphagous insect the toxicity was caused mainly by compounds **3** and **4** in larvae and pupae (table 4). Kumari *et al.*, 2003 evaluated neo-clerodane diterpenoids isolated from *Clerodendron* species (Verbenaceae) on *S. litura* and showed that the main effect occurred in the larval period of this species. They observed significant increases in the larval period and subsequent larval mortality. Compared with our work the larval mortality was significant for the above compounds at 100 and 150 µg/g. The use of secondary metabolites is an alternative method for the control of insects on integrated pest management programs and a good strategy

for cultures and stored products. Over 400 natural and semi-synthetic clerodanes have been examined in laboratory assays, yielding several compounds with potent antifeedant activity against various insect species. This is the first report on biological activity of diterpenoid glycosides from *S. quadripartitus* against *S. frugiperda* and *P. interpunctella*, key pests in walnuts in Province of La Rioja- Argentina.

## 5 ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank Dr. Alicia Bardón for reading and providing suggestions for the writing, and Dr. Cecilia Sokolsky for the identification of the compounds tested. The financial support was made by the School of Natural Sciences and Department of Basic and Technological Sciences of Universidad Nacional de Chilecito, Argentina.

## REFERENCES

Abbaszadeh, G.; Srivastava, C.; Walia, S. (2014) Insecticidal and antifeedant activities of clerodane diterpenoids isolated from the Indian Bhand Tree, *Clerodendron infortunatum*, against the cotton Bollworm, *Helicoverpa armigera*. *Journal Insect Science*, vol. 14, 1-13.

Ajaha, A.; Bouayad, N.; Aarab, A.; and Rharrabe, K. (2019) Effect of 20 hydroxyecdysone, a Phytoecdysteroid, on development, digestive, and detoxification enzyme activities of *Tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenebrionidae). *Journal Insect Science*, vol. 19, 1-6.

Borzoui, E.; Naseri, B.; Abedi, Z. and Karimi-Pormehr, MS (2016) Lethal and sublethal effects of essential oils from *Artemisia khorassanica* and *Vitex pseudo-negundo* against *Plodia interpunctella* (Lepidoptera: Pyralidae). *Environmental entomology*, vol. 45, 1220-1226.

Coll J and Tandón Y (2005) Isolation and structure elucidation of three neo-clerodane diterpenes from *Teucrium fruticans* L. (LABIATAE). *Phytochemistry*, vol. 66, 2298–2303.

Corzo, F.L.; Gilabert, M.; Alcaide, M.F. and Bardón A. (2012) Toxicity of *Porella chilensis* Sesqui- and Diterpenoids against Larvae of the corn pest *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae). *Neotropical Entomology*, vol. 41, 414-419.

Corzo F.L.; Traverso, L.; Sterkel M.; Benavente, A.; Ajmat MT. and Ons, S. (2020) *Plodia interpunctella* (Lepidoptera: Pyralidae): Intoxication with essential oils isolated from *Lippia turbinata* (Griseb.) and analysis of neuropeptides and neuropeptide receptors, putative targets for pest control. *Archives of Insect Biochemistry and Physiology*, vol. 104, 1-17.

Gill H K and Garg H (2014) Pesticides: Environmental Impacts and Management Strategies. *INTECH open*, vol. 8, 188-230.

Glauser, G.; Marti, G.; Villard, N.; Doyen, G.A.; Wolfender, J.L.; Ted C.J. Turlings. and Erb, M (2011) Induction and detoxification of maize 1,4-benzoxazin-3-ones by insect herbivores. *The Plant Journal*, vol. 68, 901-911.

González-Coloma, A.; Guadaño, A.; Tonn C.E, and Sosa M.E (2005) Antifeedant/Insecticidal Terpenes from Asteraceae and Labiatae Species Native to Argentinean Semi-arid Lands. *Verlag der Zeitschrift für Naturforschung*, vol. 60, 855- 861.

- Klein Gebbinck E.A.; Jansen B.J.M; and de Groot Ae (2002) Review: Insect antifeedant activity of clerodane diterpenes and related model compounds. *Phytochemistry*, vol. 61, 737-770.
- Kumari, K.G.N.; Balachandran J.; Aravind S. and Ganesh M. R. (2003) Antifeedant and growth inhibitory effects of some neo-clerodane Diterpenoids isolated from Clerodendron Species (Verbenaceae) on *Earias vitella* and *Spodoptera litura*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 51, 1555-1559.
- Mohandass, S.; Arthur, F. H.; Zhu K.Y.; Throne, J. E. (2007) Biology and management of *Plodia interpunctella* (Lepidoptera: Pyralidae) in stored products. *The Journal of Stored Products Research*, vol. 43, 302-311.
- Ramírez, M.; Kamiya, N.; Popich, S.; Asakawa, Y.; Bardón, A. (2010) Insecticidal constituents from the Argentine liverwort *Plagiochila bursata*. *Chemistry & Biodiversity*, vol. 7, 1855-1861.
- Raghavendra, KV.; Gowthami, R.; Lepakshi, NM.; Dhananivetha, M.; Shashank R. (2016) Use of botanicals by farmers for integrated pest management of crops in Karnataka. *Asian Agri History Foundation*, vol. 20, 173-180.
- Rimoldi, F.; Fogel, M.N.; Scheneider, M. I.; Ronco, A. E. (2015) Efectos indirectos de insecticidas convencionales y biorracionales sobre la alimentación de *Rachiplusia nu* (Lepidoptera: Noctuidae). *Revista Colombiana Entomología.*, vol. 41, 41-47.
- Rodríguez, R.; Marticorena, C.; Alarcón, D.; Baeza, C.; Cavieres, L.; Finot, V. L.; Fuentes, N.; Kiessling, A.; Mihoc, M.; Pauchard, A.; Ruiz, E.; Sanchez, P.; Marticorena, A. (2018) Catálogo de las plantas vasculares de Chile. *Gayana Botanica*, vol. 75, 1-430.
- Ruiz Hidalgo, J.; Parellada, E.A.; Di Toto Blessing, L.; Bardón, A.; Ameta, K.L.; Vera, N.; Neske, A. (2016) Natural and derivatized acetogenins promising for the control of *Spodoptera frugiperda* Smith. *Journal of Agricultural Chemistry and Environment*, vol. 5, 200-210.
- Salgado Garciglia, R.; Cortés Rodríguez, MA.; del Río RE (2008) Uso de brasinoesteroides y sus análogos en la agricultura. *Biológicas*, vol. 10, 18-27.
- Simmonds, M. S. (2006) The search for plant-derived compounds with antifeedant activity. *Advances in Phytomedicine*, vol. 3, 291-324.
- Silva, D.M.; De Freitas Bueno, A., Andrade, K., Dos Santos Stecca, C., Oliveira Janeiro Neves, P. M.; Neves de Oliveira, M.C. (2017) Biology and nutrition of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) fed on different food sources. *Scientia Agricola*, vol. 74, 18-31.
- Socolsky, C.; Asakawa, Y.; Bardón, A. (2007) Diterpenoid glycosides from the bitter Fern *Gleichenia quadripartite*. *Journal Natural Products*, vol. 70, 1837-1845.
- Sosa, A.; Diaz, M.; Salvatore, A.; Bardon, A.; Borkosky, S.; Vera N. (2019) Insecticidal effects of *Vernonanthura nebularum* against two economically important pest insects. *Saudi Journal of Biological Sciences*, vol. 26, 881-889.
- Souza Aguiar, W.R.; Romero Ferreira de Oliveira, C.; Cysneiros Matos, C.H.; D'Antonino Faroni, L.R. (2003) Uso do congelamento no controle de insetos-Praga de grãos armazenados. *Bioscience Journal*, vol. 19, 21-25.
- Statistix 7.1 (2000) Analytical Software.
- Su, Q.; Zhou, Z.; Zhang, J.; Shi, C.; Zhang, G.; Jin, Z.; Wang, W.; Li, Ch. (2017) Effect of plant secondary metabolites on common cutworm, *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae). *Entomological Research*, vol.48, 16-28.

Topçu G; Gören AC. (2007) Biological activity of diterpenoids isolated from anatolian Lamiaceae plants. *Records of Natural Products*, vol. 1, 1-16.

Yu S.J.; McCord E Jr. (2007) Lack of cross-resistance to indoxacarb in insecticide-resistant *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) and *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Yponomeutidae). *Pest Management Science*, vol. 63, 63-67.

Zarate, N.; Diaz, O.; Martinez, A.M.; Figueroa, J.I.; Schneider, M.I.; Smagghe, G.; Viñuela, E.; Budia, F.; Pineda, S. (2011) Lethal and sublethal effects of methoxyfenozide on the development, survival and reproduction on of the fall Armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae). *Neotropical. Entomology*, vol. 41, 129-137.

# CAPÍTULO 20

## ANÁLISIS DE CASO EN EL CAMPO DE LA INGENIERÍA HACIENDO USO DE TÓPICOS DE LAS CIENCIAS BÁSICAS. UN ENFOQUE BASADO DISEÑO INSTRUCCIONAL

Data de submissão: 15/01/2023

Data de aceite: 30/01/2023

**Alejandro Armando Hossian**

Dr. Ing.

Universidad Tecnológico Nacional  
Plaza Huincul-Provincia de Neuquén  
República Argentina

**Emanuel Maximiliano Alveal**

Tec. Elec.

Universidad Nacional del Comahue  
Neuquén-Provincia de Neuquén  
República Argentina

**RESUMEN:** La presente propuesta metodológica se enmarca dentro del proyecto de investigación con asentamiento en el departamento de Ciencias Básicas de la Facultad Regional Neuquén de la Universidad Tecnológica Nacional. La metodología propuesta incluye cuatro fases que se llevan a cabo en forma gradual, de manera que el estudiante se sienta capaz de desarrollar un análisis conceptual del caso de estudio. Por consiguiente, se analiza un caso de aplicación en el campo de la Ingeniería con una marcada inclinación a la exploración de las ecuaciones que conforman el modelo matemático del

caso en cuestión, en aras de la consecución de un diseño robusto que sea alcanzable por un estudiante medio de la carrera de Ingeniería. Los autores se basan en las teorías prescriptivas del diseño instruccional para su investigación, habida cuenta de que las mismas están orientadas hacia la práctica y estimulan el análisis crítico y reflexivo de situaciones problemáticas ingenieriles.

**PALABRAS CLAVE:** Desarrollo cognitivo. Instrucción. Modelo matemático. Teorías prescriptivas. Energía.

CASE ANALYSIS IN THE FIELD OF  
ENGINEERING USING TOPICS FROM BASIC  
SCIENCES. AN INSTRUCTIONAL DESIGN  
BASED APPROACH

**ABSTRACT:** This methodological proposal is part of the research project established in the Department of Basic Sciences of the Neuquén Regional Faculty of the National Technological University. The proposed methodology includes four phases that are carried out gradually, so that the student feels capable of developing a conceptual analysis of the case study. Therefore, an application case in the field of Engineering is analyzed with a marked inclination to explore the equations that make up the mathematical model of the case in question, in order to achieve a robust design that is achievable by a student. middle of engineering degree. The authors rely on prescriptive theories of instructional design for

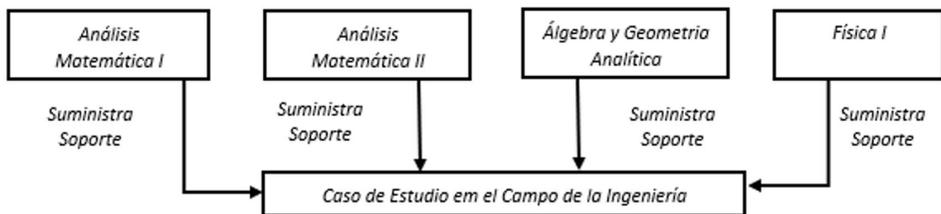
their research, given that they are practice-oriented and encourage critical and reflective analysis of engineering problem situations.

**KEYWORDS:** Cognitive development. Instruction. Mathematical model. Prescriptive theories. Energy.

## 1 INTRODUCCIÓN

La columna vertebral de esta labor de investigación es la tesis de maestría en el campo de la Ingeniería de Software desarrollada y defendida en la Universidad Politécnica de Madrid: “Sistema de Asistencia para la Selección de Estrategias Instruccionales”, que consistió en la construcción de un sistema experto que recomienda estrategias y actividades de enseñanza en función de variables educativas tales como: características del estudiante, tipo de contenido a enseñar, objetivos y ambiente de aprendizaje entre otras. Se asume como hipótesis de partida del presente trabajo de investigación que el estudiante medio de la carrera de ingeniería atraviesa por una serie de fases hasta adquirir el grado de madurez suficiente para elaborar y resolver un modelo simplificado de la realidad asociada con un determinado problema que se le presenta. En este sentido, se analiza un caso de estudio en el campo de la Ingeniería con una fuerte impronta de tópicos de las Ciencias Básicas, entre los cuales se destacan contenidos curriculares pertenecientes a asignaturas tales como: Análisis Matemático I, Análisis Matemático II, Álgebra y Geometría Analítica y Física I; entre otras. En esta interesante experiencia interdisciplinaria colaboran los equipos de las cátedras de las materias mencionadas a los efectos de que los estudiantes logren un análisis robusto y satisfactorio del caso presentado, tiene lugar en un escenario de cooperación entre las asignaturas que intervienen en el proceso de instrucción tal como se ilustra en la Fig. 1:

Fig. 1. Vinculación entre las asignaturas del Ciclo Básico que dan soporte caso de estudio en Ingeniería.



Mediante este proceso de instrucción se intenta dotar al alumno de las herramientas necesarias que le permitan abordar de manera satisfactoria la tarea de construcción y resolución de modelos asociados a un problema real.

## 2 MARCO TEÓRICO

En esta sección se exponen los fundamentos de los conceptos de “instrucción” y de las “teorías de la instrucción”, los cuales constituyen la base teórica de este proceso de instrucción.

### 2.1 CONCEPTO DE INSTRUCCIÓN

La instrucción puede ser vista como la creación intencional de condiciones en el ambiente de aprendizaje con el objeto de facilitar la obtención de ciertos objetivos educacionales. Desde un punto de vista didáctico, la instrucción consiste en un conjunto de actividades de aprendizaje que se vinculan con todo lo que se espera que realicen los estudiantes con la finalidad de aprender, practicar, aplicar y evaluar entre otras cosas. Estas actividades se articulan en determinadas estrategias de instrucción, las cuales ofrecen una guía explícita acerca de la forma más adecuada de implementar estas actividades.

### 2.2 TEORÍAS DE INSTRUCCIÓN

Los fundamentos teóricos que sustentan lo expuesto en la sección anterior se pueden analizar desde una perspectiva “descriptiva” o “prescriptiva”:

- **Perspectiva Descriptiva:** se consideran a estas teorías como un conjunto de descripciones concernientes a qué resultados se observan como consecuencia de la aplicación de un proceso de instrucción dado y bajo ciertas condiciones del entorno de aprendizaje. Es decir, ayudan a describir los efectos que se producen cuando tiene lugar una determinada clase de sucesos causales.
- **Perspectiva Prescriptiva:** estas teorías pueden ser vistas como un conjunto de prescripciones tendientes a identificar cuál será el proceso de instrucción óptimo para obtener los resultados deseados bajo determinadas condiciones del ambiente educativo. A estas teorías se las llama “Teorías del Diseño Instruccional” o “Teorías de Diseño Educativo” y están orientadas hacia la práctica o hacia un objetivo. Por ejemplo, si se desea fomentar la retención a largo plazo de algún tipo de información nueva (un objetivo educativo), se sugiere ayudar al estudiante a que relacione esa información con otro tipo de conocimientos asociados que haya recibido con anterioridad (un método educativo).

### 3 CASO DE ESTUDIO EN EL CAMPO DE LA INGENIERÍA

Este caso de estudio se focaliza en un proceso de instrucción que se compone de cuatro “etapas”, a partir de las cuales el estudiante introduce aquellos conceptos que constituyen la base del dominio de conocimiento del problema que analiza, para luego elaborar las asociaciones existentes entre estos conceptos, confecciona el modelo matemático que mejor representa la realidad del caso y resuelve el modelo haciendo uso de una batería de tópicos de las Ciencias Básicas que dispone en esta instancia del proceso de instrucción. A continuación, se detallan cada una de las cuatro etapas del proceso de instrucción propuesto.

Etapla I: Incorporación de los conceptos base del domino del problema a la estructura cognitiva del estudiante.

En esta etapa el estudiante incorpora los conceptos más relevantes en relación con el dominio que se le presenta. Los procesos cognitivos que se presentan con mayor frecuencia en esta etapa son la adquisición de conocimientos y la comprensión, y las estrategias de enseñanza más apropiadas son:

- 1) Formulación de preguntas con una fluida retroalimentación acerca de las respuestas que brinda el estudiante.
- 2) Estrategias que promueven la asociación de los conocimientos previos que posee el estudiante con los conceptos que están presentes en el problema.

Se presenta un caso de estudio a nivel de proyecto preliminar sin datos numéricos (lo que permite realizar un análisis más profundo de la situación), tomando como base un modelo ingenieril de un bloque descendiendo por un plano inclinado que luego se conecta con una superficie circular en ausencia de fricción. Se le presentan al estudiante dos situaciones, donde en ambas debe obtener la altura mínima desde la cual se debe dejar caer el bloque (que se corresponde con la altura del plano), de manera tal de que se cumplan ciertos requisitos de diseño.

Situación 1: el rizo circular es sin corte y se debe obtener la altura mínima desde la cual debe caer el bloque para que el mismo pueda llevar a cabo la vuelta completa sin desprenderse del rizo, tal como se ve en Fig. 2. Asimismo, el estudiante debe verificar que la fuerza normal máxima que el bloque ejerce sobre la superficie de deslizamiento, no exceda de un valor admisible establecido a nivel de proyecto.

Situación 2: el rizo circular es con un corte simétrico reflejado por el ángulo  $\alpha$  que forma la línea que une el centro de la circunferencia con el punto A y la vertical que pasa por el centro, tal como se ve en Fig. 3. Ahora el estudiante debe obtener la altura mínima desde la cual debe caer el bloque para que el mismo pueda volar en tiro oblicuo bajo

el efecto de la fuerza de gravedad, llegando a la continuación del rizo en el punto B (el detalle de esta consigna se vislumbra mejor en Fig. 6). También en este caso el estudiante debe verificar que la fuerza normal máxima que el bloque ejerce sobre la superficie de deslizamiento, no exceda de un valor admisible establecido a nivel de proyecto para la altura mínima obtenida en para esta situación.

Fig. 2. Primera situación real del caso de estudio. Rizo normal sin corte.

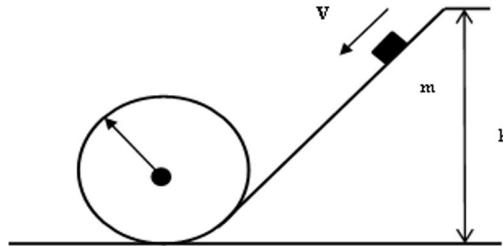
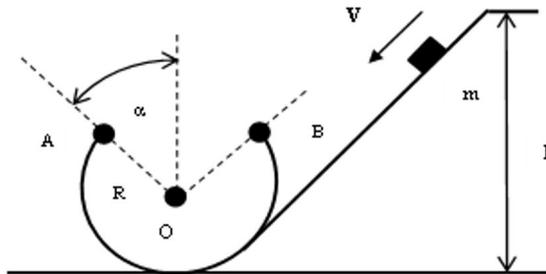


Fig. 3. Segunda situación real del caso de estudio. Rizo normal con un corte.



Tanto para la situación 1 como para la 2, los conceptos sustanciales que se presentan en la estructura cognitiva del estudiante en esta instancia son numerosos y corresponden a las asignaturas mencionadas. Entre los más relevantes se destacan los siguientes: fuerza, masa, aceleración, relaciones trigonométricas, descomposición de fuerzas, conservación de la energía y leyes de la dinámica. El estudiante identifica estos conceptos y va reflexionando acerca de la necesidad de vincularlos, pasando así al desarrollo de la siguiente etapa del proceso.

Etapa II: Construcción de un modelo conceptual del problema en la estructura cognitiva del estudiante.

A partir de esta etapa se plantea el caso para la situación 1 de rizo sin corte. En esta etapa el estudiante asocia los conceptos reconocidos en la etapa anterior y añade otros que le pueden ser de utilidad. Los procesos cognitivos vinculados a esta etapa consisten en la aplicación de leyes y teoremas. Las estrategias que mejor se ajustan son:



Para realizar estas estrategias, se diseñan actividades tales como experiencias más avanzadas en laboratorio y la simulación de mecanismos haciendo uso del software apropiado. El estudiante exige su capacidad de abstracción por medio de un proceso mental que le permite sintetizar e integrar todos los conceptos identificados en las etapas I y II. Para esto, aplica 2 leyes claves para la obtención modelo matemático de la situación real:

- Leyes Newton de la Dinámica.
- Ley de Conservación de la Energía.

En base al cuerpo de conocimientos adquirido por el estudiante y las dos leyes mencionadas, se poseen las herramientas para confeccionar las ecuaciones que conforman el modelo matemático en cuestión. De la primera ley el estudiante infiere que es una ecuación vectorial (ecuación 1) y debe descomponer la misma en una dirección tangente al movimiento y otra normal (ecuaciones 2 y 3); siendo  $a_t$  y  $a_r$  las aceleraciones tangencial y radial respectivamente, y  $v_D$  la velocidad del bloque en el punto genérico D. El planteo de un nuevo diagrama de cuerpo libre como el de Fig. 5 facilita el planteo de estas ecuaciones. De la ecuación 3 se obtiene N (ecuación 4).

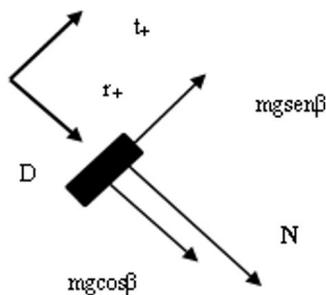
$$(1) \quad \vec{P} + \vec{N} = m \vec{a}$$

$$(2) \quad mg(\text{sen } \beta) = ma_t$$

$$(3) \quad mg(\cos \beta) + N = ma_r \Rightarrow mg(\cos \beta) + N = m \frac{v_D^2}{R}$$

$$(4) \quad N = mg \left( \frac{v_D^2}{gR} - \cos \beta \right)$$

Fig. 5. Diagrama de Cuerpo Libre en un punto D genérico de la curva donde la fuerza  $P = mg$  ha sido descompuesta en la dirección radial ( $r+$ ) y la dirección tangente a la superficie circular ( $t+$ ).



En esta instancia de esta etapa el estudiante observa que la ecuación 2 no es utilizada en el proceso de resolución de caso de estudio, aunque la misma pone de

manifiesto una ley de causa – efecto en la dirección de movimiento del bloque. No obstante, es instructivo que observe que esta ecuación refleja la naturaleza del movimiento. En este sentido la  $a_t$  es causada por la componente del peso en la dirección tangente a la circunferencia ( $mg\text{sen}\beta$ ); y como esta fuerza depende del ángulo  $\beta$ , también  $a_t$  depende de  $\beta$ . Si el estudiante analiza esta situación en función del tiempo observa que conforme el bloque va subiendo por el rizo disminuye  $\beta$ , por ende el  $\text{sen}\beta$ , la componente  $mg\text{sen}\beta$  y  $a_t$ . Por lo tanto, es un movimiento circular desacelerado (no uniformemente variado), donde la velocidad  $v$  disminuye en el tiempo.

Hallar la velocidad en un punto genérico del rizo como el D ( $v_D$ ) es importante para hallar  $N$  en la ecuación 4; lo cual requiere, por las razones expuestas, del cálculo integral. Por tal motivo, el estudiante emplea la ley de conservación de la energía mecánica en ausencia de fuerzas de carácter no conservativo, como las de rozamiento. Luego como la fuerza normal  $N$  con la que la superficie del rizo acciona sobre el bloque es perpendicular a la velocidad del mismo en todo punto (como el D), esta fuerza no realiza trabajo. De esta manera, la reserva total de energía mecánica entre 2 puntos cualesquiera queda invariable.

Con este esquema conceptual, el estudiante plantea el balance de energía mecánica entre el punto inicial más alto de la configuración (punto C en Fig. 4 que se corresponde con la altura  $h_C$  y desde donde el bloque parte del reposo) y un punto genérico (punto D en Fig. 4 que se corresponde con la altura  $h_D$  y donde el bloque está animado de una velocidad  $v_D$ ).

De forma consecuente con este análisis, el estudiante asocia en su estructura cognitiva que la energía mecánica en un punto es la suma de energía potencial y cinética. En el contexto del presente caso, observa que en el punto C el bloque solo posee energía potencial gravitatoria y en D posee energía potencial gravitatoria. E esta manera, al efectuar el balance de energía mecánica entre los puntos C y D, y deduciendo de Fig. 4 que:  $h_D = R + R\cos\beta \rightarrow h_D = R(1 + \cos\beta)$ , obtiene la ecuación (5). Luego despeja  $v_D$  de ésta obteniendo la ecuación (6).

$$(5) \quad E_{MC} = E_{MD} \Rightarrow mgh_C = mgR(1 + \cos\beta) + \frac{mv_D^2}{2}$$

$$(6) \quad v_D^2 = 2gR\left(\frac{h_C}{R} - 1 - \cos\alpha\right)$$

Y sustituyendo esta última en la expresión (4) se obtiene para  $N$  la expresión (7):

$$(7) \quad N = mg\left(2\frac{h_C}{R} - 2 - 3\cos\beta\right)$$

Si el estudiante analiza esta expresión como función del ángulo  $\beta$  ( $N(\beta)$ ), para un mismo  $R$  y  $h_C$ , infiere que la fuerza normal  $N$  con la que la superficie del rizo acciona sobre el bloque adquiere su valor máximo para  $\beta = \pi$  ( $\cos \pi = -1$ ); es decir, en el punto inferior del rizo (punto F de FIG. 4). Cabe señalar, a efectos de incorporar en el estudiante aspectos vinculados al diseño, que este valor máximo de  $N$  no debería superar un valor admisible ( $N_{ADM}$ ) de fuerza normal estipulada por el diseñador. Este valor admisible puede depender del tipo de material y otros requisitos establecidos en el diseño del rizo. Estos aspectos el estudiante los sintetiza en la ecuación (8).

$$(8) \quad N_{MAX} = mg \left( 2 \frac{h_C}{R} + 1 \right) \leq N_{ADM}$$

De la expresión (7) se infiere que  $N$  presenta un comportamiento monótonamente decreciente con el ángulo  $\beta$ ; con lo que su valor disminuye a medida que el bloque asciende por el rizo, llegando a su valor mínimo en el punto superior E de Fig. 4, al que corresponde  $\beta = 0$  ( $\cos \beta = 1$ ). Se obtiene la expresión (9):

$$(9) \quad N_{MIN} = mg \left( 2 \frac{h_C}{R} - 5 \right)$$

Cuando el estudiante lleva a cabo un análisis físico de la expresión (9), si a partir de la misma establece que el bloque no se separa del rizo en el punto superior E de Fig. 4, significa que no se va a separar de él en ningún otro punto. En otras palabras, para un  $h_C$  dado el valor mínimo para  $N$  va a estar dado por la expresión (9). Ahora bien, si se desea obtener la altura inicial mínima ( $h_{CMIN}$ ) a partir de la cual el bloque es capaz de llevar a cabo una vuelta completa sin separarse del rizo, esta se obtiene mediante la expresión (9) anulando  $N_{MIN}$ . Desde un punto de vista más fino, el estudiante concibe en su estructura cognitiva que  $N_{MIN}$  es función lineal de  $h_C$  ( $N_{MIN}(h_C)$ ). Por lo que debe obtener el valor de la variable  $h_C$  que anula la función, es decir  $N_{MIN}$  (ecuación (10)).

$$(10) \quad h_{CMIN} = \frac{5}{2} R = 2,5R$$

El estudiante infiere que para un valor de  $h_C$  menor de  $2,5R$  el bloque se desprende del rizo antes de llegar al punto superior E de Fig. 4, volando en tiro oblicuo bajo la acción de la gravedad. Para un valor de  $h_C$  mayor de  $2,5R$  el bloque da la vuelta completa soportando en el punto superior E de Fig. 4 (es importante que no se pierda de vista este concepto, dado el  $N_{MIN}$  obtenido en la expresión (9) se obtuvo especializando la expresión (7) para  $\beta = 0$  ( $\cos \beta = 1$ )) una fuerza normal  $N_{MIN} > 0$  que el rizo ejerce sobre él.

Etapa IV: Resolución del modelo matemático y análisis crítico y discusión de los resultados obtenidos.

En esta etapa el estudiante resuelve el modelo matemático planteado en la etapa III. Los procesos cognitivos asociados a esta fase consisten en:

- Resolución del modelo matemático en función de los parámetros que establece el problema y con las herramientas matemáticas disponibles.
- Análisis crítico y discusión de los resultados obtenidos a partir del desarrollo del proceso 1.

En esta etapa del proceso de instrucción el estudiante desarrolla modelos mentales de la situación que analiza con una mayor flexibilidad cognitiva respecto a las etapas anteriores. Las estrategias que se adoptan consisten en técnicas de comunicación que activen formas de pensamiento cooperativo y el trabajo grupal; y se implementan actividades tales como el uso de software de matemática para agilizar los cálculos y el manejo de las funciones que se ajusten al caso, para que el estudiante se focalice en el análisis de los resultados.

En lo concerniente a la situación 1 del rizo sin corte, se asume a efectos prácticos que esta etapa el estudiante la ha ido cumplimentando en la etapa anterior, conforme ha ido obteniendo las expresiones en forma de razonamiento encadenado. De esta manera, la discusión y análisis crítico ha ido tomando forma en su estructura cognitiva al obtener expresiones NMAX, NMIN y hCMIN. Para esta situación clásica del rizo sin corte, el estudiante atravesaría esta etapa IV dotando de valores numéricos al modelo para analizar los resultados encontrados.

En virtud de lo expuesto, los autores consideran que es importante profundizar en el caso de estudio proponiendo al estudiante el abordaje de la situación 2 del rizo con corte. Por razones de espacio para el desarrollo del presente trabajo, se hará referencia a aquellas cuestiones distintivas entre una situación y otra. En este sentido, las cuestiones de carácter conceptual referidas al proceso de instrucción son similares a la situación 1, al igual que también son válidas las ecuaciones (1) a (8) y el diagrama de cuerpo libre de Fig. 5 para un punto genérico del rizo. De esta manera, se adiciona para cada etapa los elementos que el estudiante debe incorporar en su estructura cognitiva, a los efectos de abordar en forma satisfactoria el análisis y modelado de la situación 2.

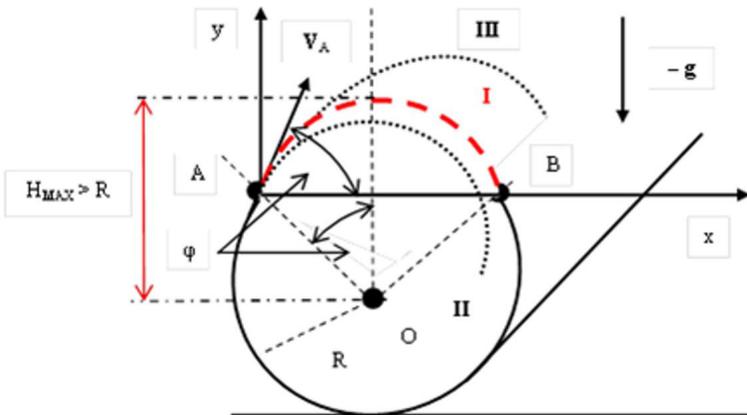
Etapa I: Incorporación de los conceptos base del domino del problema a la estructura cognitiva del estudiante.

El estudiante hace uso de la Fig. 3 de rizo con corte como modelo físico, a la vez que incorpora a su modelo mental los conceptos referidos a tiro parabólico, dado que así es como sale el bloque del punto A en Fig. 3. Los demás conceptos base del domino del problema le son de utilidad al estudiante para abordar esta situación.

Etapa II: Construcción de un modelo conceptual del problema en la estructura cognitiva del estudiante.

Cabe recordar que en este caso el rizo circular presenta un corte simétrico reflejado por el ángulo  $\alpha$  que forma la línea que une el centro de la circunferencia con el punto A y la vertical que pasa por el centro, tal como se ve en Fig. 3. El desafío que se le presenta al estudiante en esta situación consiste en obtener la altura mínima desde la cual debe caer el bloque para que el mismo pueda volar en tiro oblicuo bajo el efecto de la fuerza de gravedad, llegando a la continuación del rizo en el punto B. En una instancia más avanzada, debe analizar cómo se relaciona esta altura con el ángulo que caracteriza al corte. Las características fundamentales del movimiento del bloque por el rizo con corte se ilustran con detalle en la Fig. 6.

Fig. 6. Movimiento del sólido por el rizo con corte entre los puntos A y B.



En lo que se refiere al modelo conceptual para esta situación 2, además de lo puntualizado para la situación 1 es preciso considerar la necesidad de colocar en forma adecuada el sistema de referencia  $x - y$ , el vector  $g$  vertical hacia abajo y en sentido contrario al eje  $y+$  y las posibles trayectorias (I, II y III referidas en Fig. 6) que puede seguir el bloque luego de abandonar el rizo en el punto A. En línea con este análisis conceptual, el estudiante se percató de que debe obtener la relación entre la velocidad con la que el bloque debe abandonar el rizo en el punto A (o sea  $v_A$ ), de tal manera que este respete la trayectoria parabólica I. En otros términos, que aterrice en el punto B como consecuencia de desarrollar esta trayectoria en tiro oblicuo. También es preciso que conecte estas consideraciones cinemáticas con las vinculadas al balance de energía y las leyes de la dinámica.

Etapa III: Construcción del modelo matemático representativo del problema.

Como ya se mencionó, en esta etapa el estudiante diseña un modelo matemático ajustado a la situación real del problema que se plantea, agregando los conceptos que son necesarios para esta situación 2. El elemento distintivo que detectó el estudiante con respecto a la situación anterior es el hecho de que el bloque sale en tiro parabólico; por lo tanto y atento a lo descrito en la Fig. 6, se plantean las ecuaciones horarias (11) y (12) que vinculan la posición del bloque según los ejes x e y con respecto al tiempo, respectivamente:

$$(11) \quad y(t) = v_A \operatorname{sen} \varphi t - \frac{1}{2} g t^2$$

$$(12) \quad x(t) = v_A \operatorname{cos} \varphi t$$

Estas 2 ecuaciones completan el modelo matemático representativo de la situación 2.

Etapa IV: Resolución del modelo matemático y análisis crítico y discusión de los resultados obtenidos

El estudiante comienza sintetizando el primer proceso cognitivo asociado a esta etapa: Resolución del modelo matemático. La dependencia de las posiciones x e y con respecto al tiempo que proporcionan las ecuaciones (11) y (12), le permiten al estudiante inferir 2 condiciones que se deben cumplir en forma simultánea, a saber: el estudiante identifica que en el mismo instante  $t_B$  en que el bloque alcanza el punto B, la coordenada en x de posición del bloque toma el valor  $2R$  y la coordenada en y es nula. Este hecho queda expresado por medio de las ecuaciones (13) y (14), que constituyen lo que se denomina “condiciones de borde” para esta situación.

$$(13) \quad 0 = v_A \operatorname{sen} \varphi t_B - \frac{1}{2} g t_B^2$$

$$(14) \quad 2R \operatorname{sen} \varphi = v_A \operatorname{cos} \varphi t_B$$

Despejando  $t_B$  de la ecuación (13) y reemplazando en la (14) se obtiene para  $v_A$  la expresión (15):

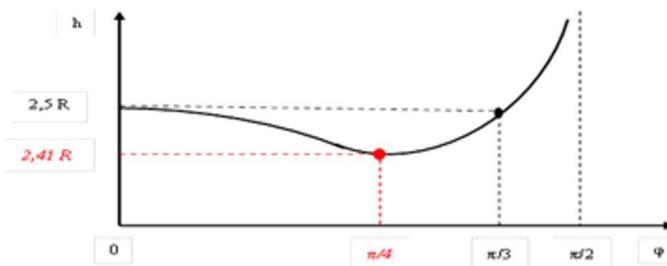
$$(15) \quad v_A^2 = \frac{gR}{\operatorname{cos} \varphi}$$

Este es el valor de velocidad con que el bloque debe abandonar el rizo con corte en el punto genérico A para que aterrice “exactamente” en el punto simétrico B, del otro lado del rizo. Para obtener la altura  $h_C$  de Fig. 4 (en este caso para el rizo con corte) en función del ángulo de corte  $\varphi$ , es preciso igualar las dos expresiones (6 y 15) evaluadas en un punto genérico, sustituyendo el ángulo  $\alpha$  por  $\varphi$  en la expresión (6). Se obtiene la expresión (16).

$$(16) \quad h_c(\varphi) = R \left[ 1 + \cos\varphi + \frac{1}{(2\cos\varphi)} \right]$$

Tomar el punto D o el A para el análisis de cuerpo libre y balance de energía (D para el rizo sin corte y A con corte), no influye en la obtención de las expresiones (6) y (15). Es importante señalar que la expresión (6) fue obtenida a partir de consideraciones energéticas y la expresión (15) a partir de consideraciones cinemáticas. La expresión (16) proporciona la altura  $h_C$  con la cual el bloque vence el rizo con corte atendiendo; tanto a las condiciones de borde (13) y (14), como al balance de energía que brinda la expresión (6). La expresión (16) no conforma el modelo matemático obtenido en la etapa III, sino que es consecuencia del trabajo del estudiante con las ecuaciones del mismo. Con la idea de adentrarse en la fase de diseño el estudiante explora la expresión (16) y detecta que para un radio  $R$  del rizo, existe una dependencia funcional entre la altura  $h_C$  y el ángulo de corte  $\varphi$  conforme a (16). En esta línea de análisis, el estudiante considera sustancial abordar la representación funcional  $h_C(\varphi)$  obteniendo la curva de Fig. 7 con los valores que presenta la misma.

Fig. 7. Variación de la altura inicial  $h$  con el ángulo de corte del rizo  $\varphi$ .



Con estos elementos, el estudiante continúa con la síntesis del segundo proceso cognitivo asociado a esta etapa: Análisis crítico y discusión de los resultados obtenidos. El estudiante analiza los siguientes factores:

- Conforme a especificaciones de diseño se debe cumplir que  $N_{MAX} \leq N_{ADM}$ ; el estudiante debe prestar suma atención a esta condición, dado que si se diese el caso de que  $N_{MAX} > N_{ADM}$ , entonces puede que también deba ajustarse el valor de  $h_C$  en la expresión (8) para que  $N_{MAX}$  sea a lo sumo igual al valor  $N_{ADM}$  en el punto inferior F del rizo en Fig.4. Este análisis es válido para ambas situaciones 1 y 2 (rizo sin corte y con corte).
- El estudiante lleva a cabo un análisis conjunto de la expresión (16) y su correspondiente representación gráfica de Fig. 7. Cabe señalar que si bien el

estudio y análisis de esta función  $hC(\varphi)$  el estudiante lo pudo haber realizado en el proceso cognitivo anterior correspondiente a Resolución del modelo matemático; los autores se permiten suponer una pequeña alteración en el orden del desarrollo. En este sentido, se puede colocar la función en software apropiado y así obtener puntos de interés (intersección con ejes, extremos relativos y puntos de inflexión, entre otros), o también que el estudiante proceda a resolver en forma manual.

- Teniendo en cuenta de que para cada valor de  $\varphi$  entre 0 y  $\pi/2$  se obtiene una altura inicial  $hC$  desde la cual se deja caer el bloque conforme a la expresión (16), se obtienen las siguientes conclusiones de interés:
  - 1) En caso de que se elija un valor de  $hC$  igual al que proporciona la expresión (16), y suponiendo que el bloque llega el punto A de Fig. 6, este desarrollará una trayectoria parabólica como la I en esa figura. Así el bloque aterriza en el punto B del rizo; y dada la simetría de la ubicación de los puntos A y B, el bloque alcanza el punto B con una velocidad dirigida por la tangente a la circunferencia (el estudiante puede demostrar este hecho a partir del cálculo diferencial, comprobando que la pendiente a la ecuación de la trayectoria I en el punto B es igual a la pendiente de la circunferencia en dicho punto).
  - 2) En caso de que se elija un valor de  $hC$  menor que el proporciona la expresión (16), e inclusive suponiendo que el bloque alcanza el punto A de Fig. 6, este desarrollará una trayectoria parabólica como la II en esa figura. En consecuencia, el bloque pega contra el rizo debajo del punto B.
  - 3) En caso de que se elija un valor de  $hC$  mayor que el proporciona la expresión (16), el bloque abandona el rizo a través del corte desarrollando una trayectoria parabólica como la III, que se ilustra en Fig. 6.
  - 4) Otra conclusión importante que se infiere de la expresión (16), es que para  $\varphi = 0$  (situación 1 de rizo sin corte)  $hC = 2,5R$ . Este valor coincide con la altura inicial mínima de ecuación (10) de rizo cerrado.
  - 5) Del análisis de la función  $hC(\varphi)$  de la expresión (16) representada en la gráfica de Fig. 7, el estudiante calcula que esta función presenta un mínimo en  $\varphi = \pi/4$ , al cual le corresponde un  $hC_{MIN} = 2,41R$ . Lo que significa que para un rizo con un radio  $R$  y un corte de  $\varphi = \pi/4$ , la altura inicial mínima desde la cual se debe dejar caer al bloque para

que llegue al punto A y alcance el punto B, es de  $h_{\text{CMIN}} = 2,41R$ . Asimismo, si con un ángulo de corte  $\varphi = \pi/4$  se adoptara una  $h_C$  menor que  $2,41R$ , entonces el bloque no llega al punto A de Fig. 6 y desarrollaría una trayectoria como la II en dicha figura.

- 6) El estudiante asocia en esta instancia, de que este valor de  $h_{\text{CMIN}} = 2,41R$  (si se adoptara en el diseño) debe sustituirse en la expresión (8), a los efectos de verificar la condición de que  $N_{\text{MAX}} \leq N_{\text{ADM}}$ .
  - 7) En lo que se refiere al comportamiento global de la función  $h_C(\varphi)$  de la expresión (16), se observa que la misma decrece en el intervalo  $[0, \pi/4]$  hasta llegar a su mínimo en  $\varphi = \pi/4$ . A partir de este punto la función comienza a crecer, observando que para un rizo con un ángulo de corte de  $\varphi = \pi/3$  se verifica que  $h_C = 2,5R$ , que es el valor de altura inicial mínima para la situación 1 de rizo sin corte. Luego se observa que la altura inicial  $h_C$  tiende al infinito conforme  $\varphi \rightarrow \pi/2$ .
  - 8) De este último punto el estudiante deduce que para ángulos de corte en el intervalo  $\pi/4 < \varphi < \pi/3$ , la altura inicial que se necesita para que el bloque pase del punto A del rizo al punto B de Fig. 6 está en el intervalo  $2,41R < h_C < 2,5R$ . Es decir, que  $h_C$  es menor que la altura mínima de rizo sin corte.
- Una última consideración que se le puede plantear al estudiante en esta instancia, consiste en verificar que la altura máxima que alcanza el bloque cuando desarrolla la trayectoria parabólica I mostrada en Fig. 6 siempre está por arriba de la continuación de la circunferencia que representa al rizo. Operando con las ecuaciones horarias de tiro parabólico se obtiene la expresión (17) para la altura máxima ( $y_{\text{MAX}}$ ):

$$(17) \quad y_{\text{MAX}} = \frac{v_A^2 \text{sen}^2 \varphi}{2g}$$

Y sustituyendo en esta expresión  $v_A^2$  de la ecuación (12) se obtiene para  $y_{\text{MAX}}$  la expresión (18):

$$(18) \quad y_{\text{MAX}} = \frac{R \text{sen}^2 \varphi}{2g \cos \varphi}$$

Se obtiene así la expresión (19) para  $H_{\text{MAX}}$  (altura máxima de la trayectoria 1 en Fig. 6 y medida desde el centro O de la circunferencia); expresión esta que es mayor que R para todo intervalo  $0 < \varphi < \pi/2$ .

$$(19) \quad H_{\text{MAX}} = R \cos \varphi + \frac{R \text{sen}^2 \varphi}{2g \cos \varphi} \Rightarrow H_{\text{MAX}} = \frac{R}{2} \left[ \cos \varphi + \frac{1}{\cos \varphi} \right]$$

## 4 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Teniendo en cuenta que el presente proyecto se encuentra en pleno desarrollo, tanto las conclusiones como los futuros lineamientos a considerar son de carácter parcial.

Respecto a las conclusiones:

- El desarrollo del proceso de instrucción en etapas, se adapta al estadio del desarrollo cognitivo que posee el estudiante.
- Se observa un ligero incremento de la maduración cognitiva de los estudiantes cuando logran comprender el significado de las expresiones analíticas obtenidas.
- Se observa un incremento en el nivel de motivación de los estudiantes cuando analizan situaciones que se corresponden con actividades vinculadas al diseño.
- Se observa que ciertos estudiantes intentan superarse para ubicarse en niveles cognitivos similares a otros que se encuentran en un nivel mayor.

Respecto a las actividades futuras:

- Potenciar el grado de interacción con asignaturas del ciclo básico, logrando así una instrucción más integral.
- Actualmente, está en desarrollo una V etapa cuyo objetivo consiste en la elaboración de una base de casos de análisis, los cuales no se almacenan como entidades aisladas, sino que se relacionan y se integran dando lugar a la conformación de ciertos “patrones” de análisis.
- Promover una mayor articulación con los ciclos superiores para realizar un seguimiento adecuado del proceso en dichos ciclos.
- Incorporar casos con espíritu crítico y analítico de manera gradual en el curso de ingreso/nivelación a la facultad de ingeniería.

## REFERENCIAS

Hossian Alejandro. Sistema de Asistencia para la Selección de Estrategias Instruccionales. Tesis de Maestría no publicada. Tesis de Magíster en Ingeniería del Software. Instituto Tecnológico de Buenos Aires. Universidad Politécnica de Madrid. España. (2003).

Gagné R. M., Briggs L. J. & Wager W. W., Principles of Instructional Design., Ed. Wadsworth/Thomson Learning. Belmont, CA. USA., 1992.

Adler, M. The Paedeia proposal: An Educationmanifiesto., Ed. Nueva York: Mc Millan., 1982.

Merrill, M. D., Instructional Transaction Theory: Instructional Design Based on Knowledge Objects., Ed. Educational Technology, 36, 30-37., 1996.

Hossian Alejandro A., Cejas Lilian., Una propuesta de diseño instruccional para su aplicación en carreras de ingeniería. Un caso de estudio en asignaturas del ciclo básico. Jornada de enseñanza de la ingeniería. Facultad Regional Buenos Aires. Universidad Tecnológica Nacional. Buenos Aires. 2011.

Reigeluth, Charles. M. Instructional design theories and models: a new paradigm of instructional theory., Ed. Lawrence Erlbaum Associates., 1999.

Jonassen, D. H. Certainty, Determinism and Predictability in Theories of Instructional Design: Lessons from Science., Ed. Educational Technology., 1997.

Perkins, D. N. Smart schools: Better thinking and learning for every child., Ed. Nueva York: The Free Press., 1992.

Ausubel, D. P. Psicología Educativa., Un punto de vista cognoscitivo., 2° Edición., Ed. Trillas., México., 1983.

Schuel, T. J., Cognitive Conceptions of Learning., Ed. Review of Educational Research., Vol 56 (4) pp. 411-436., 1996

Bútikov, M., Bíkov, A. & Kondrátiev, A., Física en ejemplos y problemas., Ed. Mir., Moscú., 1991.

Alexander C., A Timeless Way of Building., Ed. Oxford University Press., 1999.

## SUPPLEMENTARY FAILURE MODE AND EFFECT ANALYSIS (FMEA) FOR SAFETY APPLICATION STANDARDS DIN EN ISO 13849 SAFETY FUNCTION-FMEA

Data de submissão: 11/01/2023

Data de aceite: 30/01/2023

**Dipl.-Ing. Christa Düsing<sup>1</sup>**

XCMG

European Research Center GmbH

Europark Fichtenhain B4, 47807

Krefeld

**Dr.-Ing. David Prust**

XCMG

European Research Center GmbH

Europark Fichtenhain B4, 47807

Krefeld

**ABSTRACT:** In the automotive industry, the Safety Function-FMEA according to ISO 26262 and its application to functional safety relevant systems is a well-established process in the form of Automotive Safety Integrity Levels (ASILs). These represent the failure mitigation that must be applied to ensure an acceptable residual risk of malfunctioning behaviour. The DIN EN ISO 13849 (ISO 13849) already describes a process to reduce risks for machines which starts with a Hazard And Risk Analysis (HARA) as described in DIN EN ISO 12100 and concludes with the Safety Requirements Specification (SRS).

<sup>1</sup> Corresponding author.

The SRS is a functional and technical safety concept defining requirements and guidelines to make sure the design conforms to defined safety goals. ISO 13849 lists important faults and failures for various technologies. The defined Safety Functions (SFs) can be classified in corresponding categories that lead to the particular hardware/system structure. This applies to mechatronic systems consisting of at least one sensor, one control unit and one actuator to monitor the system and effect a response in case of failure. Compared to the methods described in ISO 13849, the Safety Function-FMEA allows systematic identification of additional failures resulting from combinations of effects, rather than only listing the main failure causes. Based on the complexity of the machines it is highly recommended to perform a Safety Function-FMEA as a complementary method to assess and improve the overall safety of machinery.

**KEYWORDS:** Mobile hydraulic machine. DIN EN ISO 13849. Failure Mode and Effects Analysis. FMEA. Safety Function-FMEA.

### 1 INTRODUCTION

The standard ISO 13849 [1] [2] provides safety requirements of machinery for the design and integration of Safety-Related Parts of Control Systems (SRP/CS), e.g. in the hydraulic boom system for a loader crane.

Amongst other issues, it provides general principles of design and validation. One of the main topics is to generate safety standards for machinery.

According to ISO 13849, a separate FMEA is proposed or recommended for quantification purposes for each of these described four steps:

- Risk assessment according to DIN EN ISO 12100 [3]
- Identification of preventive measures that are converted in the form of SFs
- Determine the required Performance Level (PL<sub>r</sub>)
- Selection of the categories

The first step in the FMEA process is the risk assessment according to DIN EN ISO 12100 (ISO 12100), followed by the identification of the Performance Level (PL) according to ISO 13849 [1] [2]. Once completed, the first step outlines the hazards involved in the design, the process of risk analysis and risk evaluation and the strategy for risk reduction.

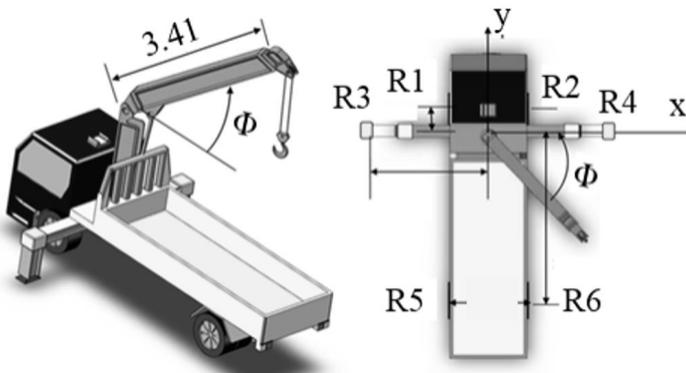
The second step details the identification of preventive measures that are converted in the form of SFs, according to ISO 13849. The SF is defined in this standard as “function of the machine whose failure can result in an immediate increase of the risk(s)” [4]. As an example, types of SFs for a hydraulic loader crane are:

- Avoiding unexpected start-up movements
- Emergency Stop function
- Safety-related stop function – initiated by a safeguard, e.g. *Overturning Protection*

**Figure 1** shows the *Overturning Protection* as an example. To avoid the loader crane from tipping over, the overturning torque (T) must be less than the counter torque for stability realized through the stabilizers, shown in equation (1):

Figure 1: Detailed example for the calculation – *Overturning Protection* [5].

$$T_{Overturning} < T_{Stability} \quad (1)$$



The third step is to determine the PLr by selecting the level of requirements for each SF. ISO 13849 [1] provides a risk graph for the elementary determination of the appropriate PLr, which includes:

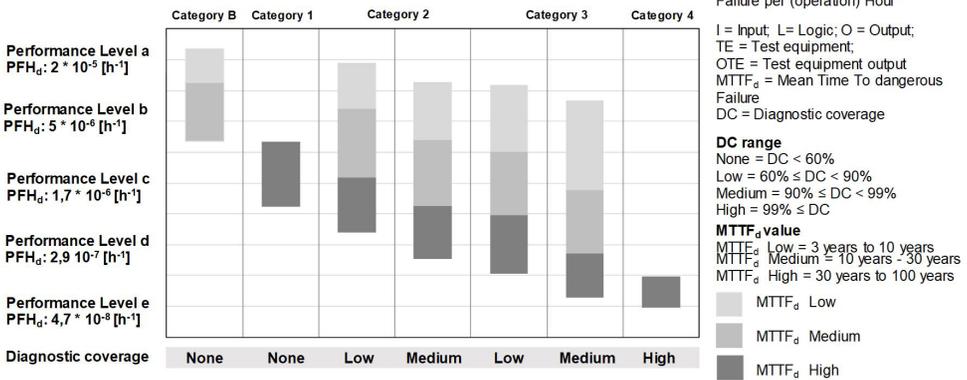
- Severity of injury (S),
- Frequency and/or exposure to hazard (F)
- Possibility of avoiding hazard or limiting harm (P)

The defined risk parameters lead directly to the PLr and represent the level of risk. The higher the PLr, the higher the fault resistance of the control system has to be designed.

Next, the categories are selected. Depending on the category selection, the influence on the design of the SRP/CS becomes apparent; for the relationship between the categories and the PL, see **Figure 2**. Each category shows typical hardware architectures of the SRP/CS and a corresponding assignment is required for each defined SF. The quantification is using the Mean Time to Dangerous Failure (MTTF<sub>d</sub>) values, the Diagnostic Coverage (DC) values, and the Probability of dangerous Failure per Hour (PFH<sub>d</sub>) values for the PL. These are integrated into the Category table according to ISO 13849 [1] see **Figure 2**, to realize the classification of the categories.

Figure 2: Relationship between categories and PL according ISO 13849 [1] [2].

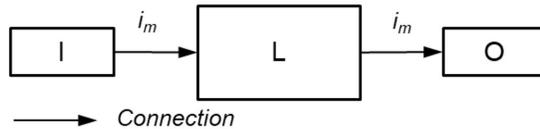
**Relationship between categories and PL**



The MTTF<sub>d</sub> values give a statistical probability of the failure of a specific component, e.g. a main control valve section, thus rating the reliability of the SFs. The DC defines the effectiveness of diagnostics, being the ratio between the rate of dangerous failures or total dangerous failures. All these parameters in total define the PL. The design architecture for each SF of the SRP/CS, for each Category is shown in **Figure 3, Figure 4 and Figure 5**.

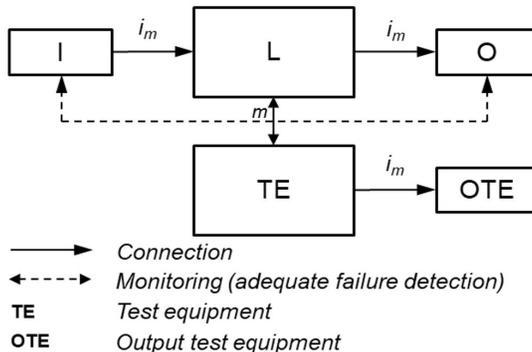
The structure of the architecture for Category B and Category 1 corresponds to a single-channel system (not redundant), as shown in **Figure 3**, with input, logic – processing and output. With Category B PL b is the maximum achievable performance level, see **Figure 2**. In Category B the minimum standard shall be designed, constructed, selected, assembled, and combined in accordance to fulfil the basic safety principles for the specific application. Category 1 shall be designed and built to use well-tried components and well-tried safety principles, according to ISO 13849 [1].

Figure 3: Designated architecture for Category B and Category 1 according to ISO 13849 [1].



Therefore, Category 1 requires that the customer can request a component which is well-tried and state of the art. Applying the standards guides manufacturers on how to confirm the achievement of well-tried components. The Category 1, supports PL b to c. In Category 2, the occurrence of a failure can result in the loss of the SFs, see **Figure 4**. As well as in Category B and Category 1, the architecture corresponds to a single-channel and continuously monitored system. The test allows detecting a dangerous failure of a component. Thereby, the choice of the frequency of the test rate decreases the occurrence of dangerous failures. With the output of the test equipment, the hardware structure includes a supplementary shutdown path.

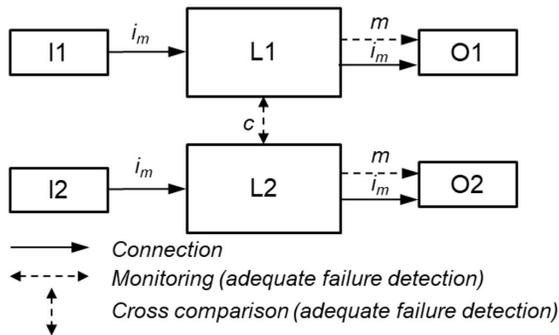
Figure 4: Designated architecture for Category 2 according to ISO 13849 [1].



As shown in **Figure 5**, the architecture for Category 3 illustrates that the performance of the SF detects some single failures with a two-channel structure (redundant), but not all failures.

However, a loss of the SF can result from the accumulation of undetected failures. Category 4 additionally uses extensive monitoring to limit undetected failures and hence the accumulation thereof. Here, the SFs always come into action when switching the machine on or during the working cycles, regardless of the accumulation of failures.

Figure 5: Designated architecture for Category 3 and Category 4 according to ISO 13849 [1].



## 2 FMEA GENERAL STRUCTURE

The Automotive Industry Action Group (AIAG) and the German Association of the Automotive Industry (VDA) released the latest publication on FMEA in 2019 [6]. FMEA structures have been completely revised and expanded by adding a new method, the “FMEA Supplement for Monitoring and System Responses” (FMEA - MSR) according to ISO 26262 [7]. The AIAG & VDA FMEA [6] standards are tailored to the automotive industry and thus, do not include a process of ISO 13849 [1] [2] for the required SFs in hydraulic control systems.

This circumstance serves the following fundamental question:

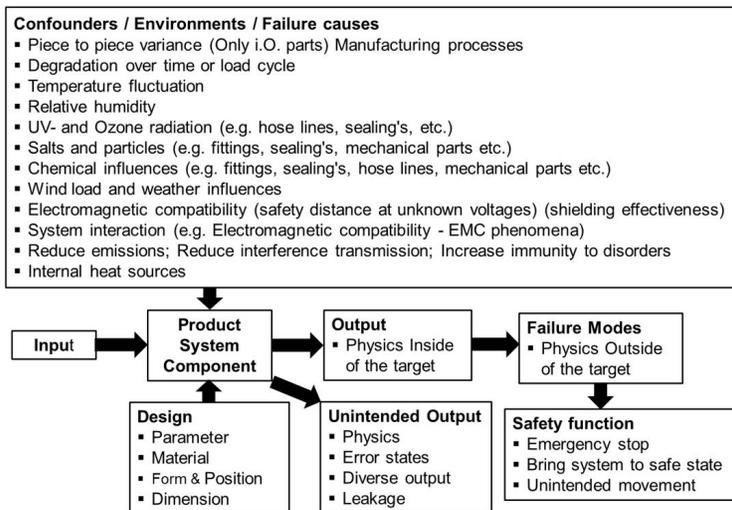
“How to integrate the defined SFs and the corresponding categories within the structure of the FMEA process?”

As guidance, this paper proposes several approaches how to perform an FMEA process for SFs in hydraulic control systems in practice. A function - as a non-safety-related function - usually describes the intended purpose of an object or a system element. One or more functions can be assigned to each other respectively AIAG & VDA [6]. Unlike this definition, safety-related functions of a mobile machine, e.g. for a hydraulic loader crane, are higher-level functions, supplemented as an add-on. These usually monitor the state of a functional system consisting of one to multiple inputs, one logic and several outputs. In the event of safety-relevant failures, the system will switch off or fall back to a safe state to maintain required safety levels.

### 3 INTEGRATION OF SFS INTO THE FMEA PROCESS FOR HYDRAULIC CONTROL SYSTEMS

When preparing a system or sub-system FMEA, it is recommended to implement a P - Diagram. The P - Diagram is a graphical representation of the system structure and shows the relationship between systems parameters, system elements and their functions in form of a block diagram. They are determined and elementarily visualized. For the standard FMEA process, the P - Diagram is built around the object under consideration of the product, system, sub-system and single component according to the scope of the analysis. It shows the input signals, the output signals, the unintended outputs, the control factors and the confounders [8]. **Figure 6** shows an example of a modified P - Diagram supplement including Failure Modes and the SFs.

Figure 6: Proposed P – Diagram example, Quality in product development [8], with modified structure.



The P - Diagram is advantageous when analysing complex systems with various system interactions, operating conditions, design parameters and complex relationships of functions. The focus in the P - Diagram may be on the input and output variables or the respective functions for the system, the sub-system or the single-components.

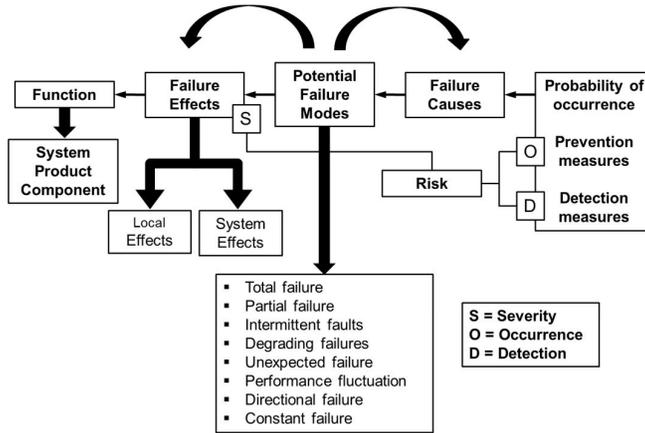
#### 3.1 THEORETICAL MODELS OF A FAILURE SEQUENCE CHAIN

The analysis of each FMEA generally consists of three various failure aspects:

- Failure Effects
- Failure Modes
- Failure Causes

These three different aspects are linked together and show a failure sequence chain depending on the focus element. For connecting Failure Causes with Failure Modes, the question is: “Why does the failure occur?” [6] and for linking Failure Effects with Failure Modes, the question is: “What happens when the Failure Mode occurs?” [6]. The standard failure sequence chain according to AIAG & VDA [6], as shown in **Figure 6**, does not comprise the SFs. The following four models of failure sequence chains represent different solutions including the integration of SFs.

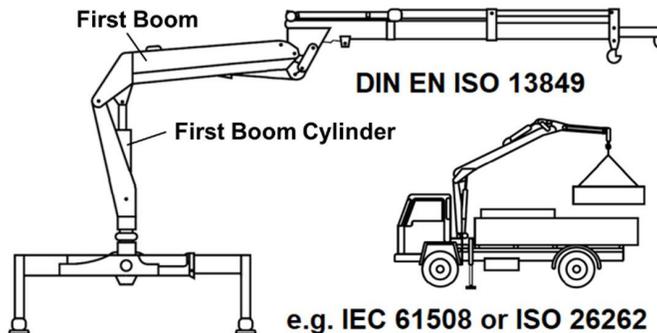
Figure 7: Standard model of a failure sequence chain according AIAG & VDA [6].



For better clarification, the following solutions show practical examples, using the sub-system first boom of a loader crane, as shown in **Figure 8** and shown as a hydraulic circuit diagram in **Figure 9**. According to the described process and the defined SFs, Category 2 PL d and Category 3 PL d are determined for the sub-system ‘first boom of a loader crane’.

In the case of the loader crane, the hydraulic pump is included in the scope of the truck hydraulics. The truck provides the required pressure supply and the corresponding flow rate via a specified hydraulic pump powered by the power take off (PTO) of the engine.

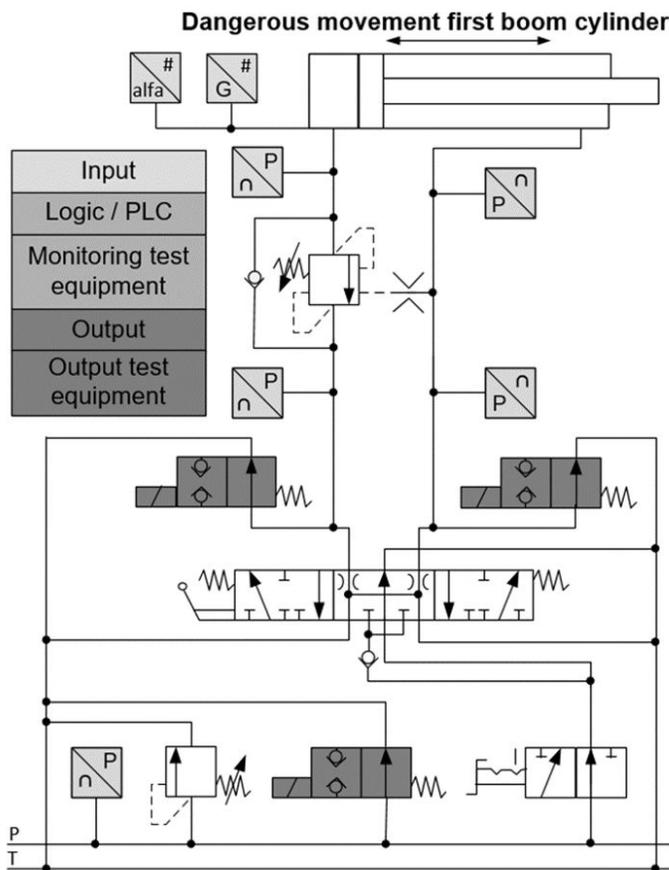
Figure 8: Loader Crane, First Boom, DIN EN 12999:2013-02+A2:2012 [9].



Thus, the hydraulics of the loader crane are directly connected to those of the truck.

The analysis of the hydraulic circuit diagram, **Figure 9**, shows all components that are essential for compliance with the SFs for the sub-system first boom.

Figure 9: Hydraulic circuit diagram, First Boom, according to the IFA Report [10].

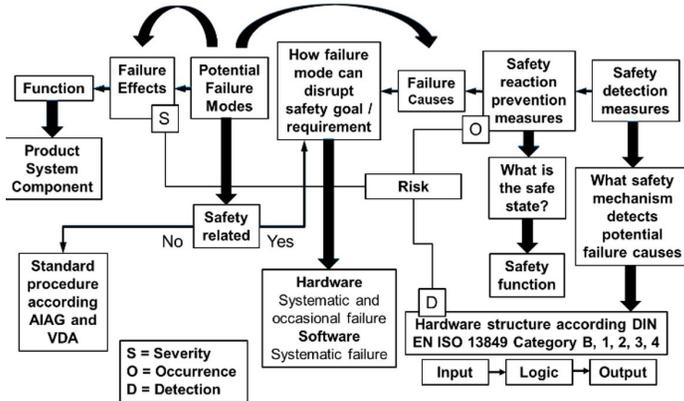


The sensors pointed out in light grey trigger the SFs. The switching valves, shown in dark grey, act as actuator of the logic and monitor values marked in mid-grey to prevent the dangerous movement of the first boom cylinder. This depends on the failure modes of the sensors and their interfaces. In compliance with basic and proven safety principles, safety valves (pressure relief valve and counterbalance valve) support the cylinder function. All electrical components are monitored by the Logic/PLC. According to the defined SFs and the corresponding Category 2 PL d the circuit implements two shutdown paths. Depending on the defined SFs, the first boom hydraulic also implements the Category 3 PL d with a two-channel structure.

*First method of safety-related solution:*

The first method of the safety-related solution of a failure sequence chain divides the Failure Modes into a safety-related part and non-safety related part. For all non-safety-related Failure Modes, the standard procedure of the FMEA process is applied according to AIAG & VDA [6]. If the Failure Modes are safety-related, further steps supplement the standard process see **Figure 10**. To achieve a better identification, a further column „How Failure Modes can disrupt safety goals/requirements“, supplements the failure sequence chain. Furthermore, the SFs are defined as preventive measures for the respective failures. The corresponding Categories defined in ISO 13849 [1] for the individual SF specify the detection structures for the relevant SFs, see **Chapter 1** Introduction. With the example of the respective SFs and their corresponding Category 2 PL d see **Figure 10**, the SFs will be defined as preventive measures to protect the system from damages. Additionally, the output of the test equipment is triggered by the safety detection measures; this reflects the two shutdown paths.

Figure 10: Proposed safety-related solution I, according ISO 26262 [7], kVA by UL [11], with modified structure to ISO 13849 [1].



The following example shows the conversion of the failure sequence chain into an FMEA structure, considering the SFs. This method of preliminary evaluation simplifies the system analysis and serves as a basis for the interface definition, and to generate the function and failure identification, see **Figure 10**.

Figure 11: Proposed structure analysis, safety-related solution I.

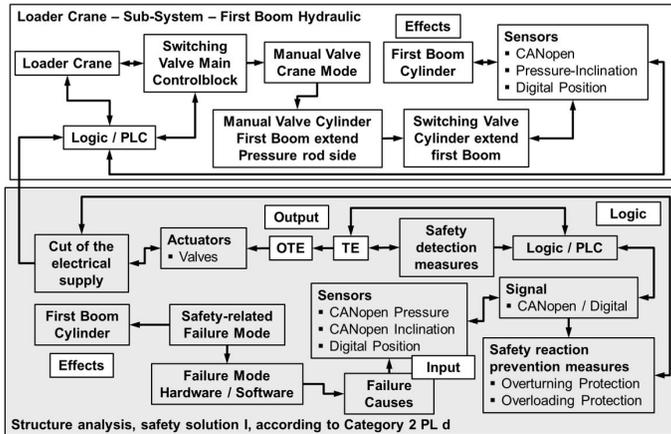


Figure 12: Proposed FMEA Form Sheet, First Boom Hydraulic, Loader Crane.

XCMG		FMEA							Number:	
		System							Page: 1	
		First Boom Hydraulic of Loader Crane								
Effect	S	C	Failure mode	How failure mode can disrupt safety goal / requirement	Cause INPUTS	Prevention action OUTPUTS	Detection action TE and OTE	D	RP	AP
<b>Loader Crane, First Boom Hydraulic</b>										
<b>System element: Main Control Block Q38 - Hydraulic supply for cylinder system</b>										
<b>Function: Crane Mode on (change from pressure free circulation to closed state)</b>										
[Loader Crane]	8	C	Crane Mode on not possible <b>(Doesn't change from pressure free circulation to closed state)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- The cable is cut</li> <li>- Wires are cut</li> <li>- Loose cable connection</li> <li>- Wire inside cable are twisted</li> <li>- Short circuit to supply</li> <li>- Short circuit to ground</li> <li>- Input / output values are stucked</li> </ul>	Initial state: 04/12/2019 [Logic / PLC] Doesn't read Sensor Signals	Safety communication -> CANopen safety BUS-System	Test equipment: Separate Processor -> Evaluation of status information, functional target ranges, time delays, and maintenance information in the context of built-in functions	4	96	L
Loss of main function										
[Loader Crane]	8	C	Doesn't transfer volume power from main pump determines the flow rate (l/min.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Output value is stucked</li> <li>- Input value is stucked</li> <li>- Measured value is outside the defined range</li> <li>- Transferred values are corrupted</li> </ul>	Initial state: 04/12/2019 [Position Sensor B3 Digital] Doesn't generate a Digital Signal that the 1st Boom is in Transport position	SF: Inclination monitoring -> The SF is used to block the boom movements if the inclination angle exceed the max. allowed value	Output of Test equipment -> Monitoring the SF	4	96	L
Loss of main function										
[Loader Crane]	8	C	Doesn't guide the power supply to actuate the magnetic of Main Control Valve and Cylinder Valves	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Output value is stucked</li> <li>- Input value is stucked</li> <li>- Measured value is outside the defined range</li> <li>- Transferred values are changed</li> </ul>	Initial state: 04/12/2019 [Position Sensor B3 Digital] Generate an incorrect Digital Signal that the 1st Boom is in Transport position	SF: Inclination monitoring -> The SF is used to block the boom movements if the inclination angle exceed the max. allowed value	Output of Test equipment -> Monitoring the SF	4	96	L
Loss of main function										

Figure 11 and Figure 12 show that the SFs are defined as safety reaction prevention measures. The task of these prevention measures is to bring the system to a safe state. The sensor signals of the respective components are monitored at start-up and/or during cyclical operation with the defined parameters for faulty signals outside the tolerance for value and time. The structure analysis also shows the two shutdown paths according to Category 2 PL d see Figure 11. Compared to the standard FMEA and their possibilities on how to integrate defined absolute characteristics into the FMEA structure, the SFs are implemented into the prevention action column of the form sheet, as shown in Figure 12. With this solution, it is not mandatory to build up the SFs with the corresponding Category 2 PL d in the function and failure networks. There is a possibility to integrate both FMEA processes (safety-related and non-safety-related) into one structure. Accordingly, the disadvantage is that the structure gets very complex.

*Second method of safety-related solution:*

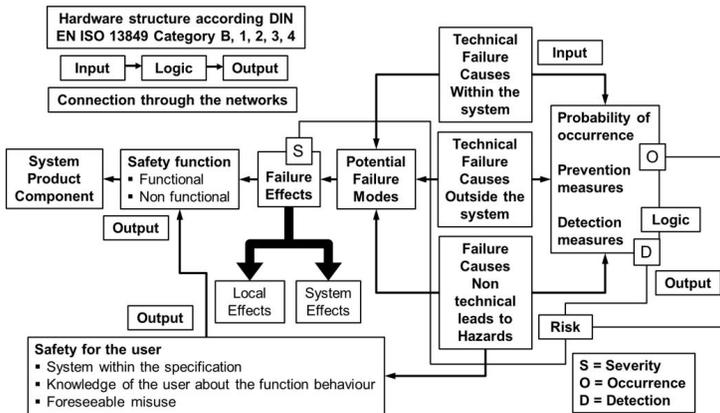
The second method of the safety-related solution of a failure sequence chain, see **Figure 13**, implements only SFs. Separately, a non-safety-related solution can be designed.

The standard model of a failure sequence chain was used as the basis. The difference to the standard model is that the Failure Causes are subdivided into three sections:

- Technical Failure Causes - Within the system
- Technical Failure Causes - Outside the system
- Failure Causes – Non-technical leads to Hazards

Additionally, there are safety-related causes triggered by the user, which influence the SFs. The implementation of the Category 2 PL d and Category 3 PL d, according to ISO 13849 [1], shall be realized in this solution through the function and failure networks.

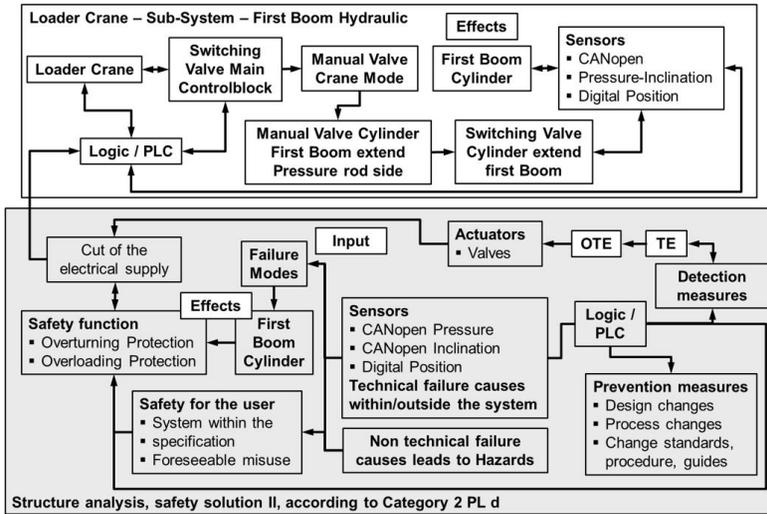
Figure 13: Safety-related solution II, Schellbach [12].



The structure analysis for the second solution into an FMEA structure, as shown in **Figure 14** differs from the safety-related solution I. Depending on the level of the focus element, the failure detection, the safety for the user and the output of logic trigger the SFs. The prevention measures are designed as in the standard model in the context of development and planning.

It is recommended to include the hardware structure for the SFs and the corresponding Category 2 PL d and Category 3 PL d into the failure and function network.

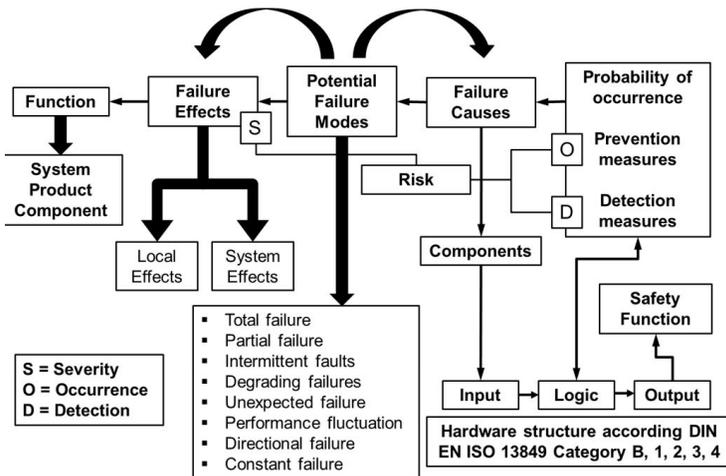
Figure 14: Proposed structure analysis, safety-related solution II.



### Third method of safety-related solution:

In the third method, as shown in **Figure 15**, the standard model of the failure sequence chain forms the basis of the procedure.

Figure 15: Proposed safety-related solution III, based on AIAG & VDA [6], with modified structure according to ISO 13849 [1] [2].

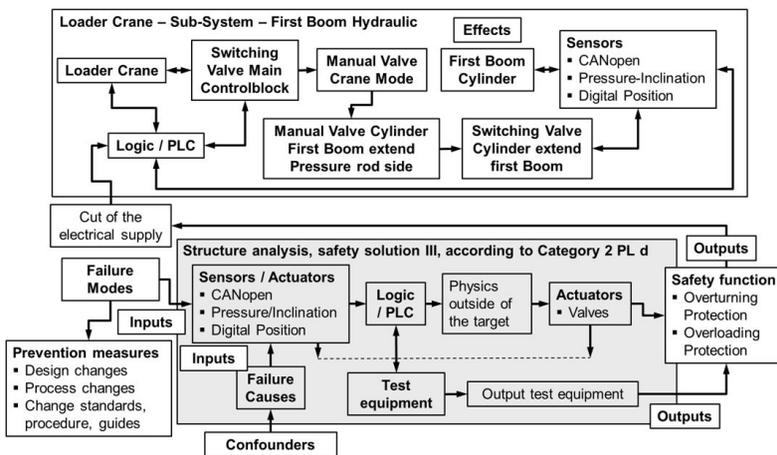


Non-safety-related functions and safety-related functions can be integrated into this solution. The sensors as safety-related failure-causing components supply the input signals for the respective functions. The failure detection is controlled through the logic, and the output triggers the corresponding SFs directly. Therefore, in this

solution, the SFs are an add-on to monitor the system elements. Depending on the SFs for Category 2 PL d and Category 3 PL “d”, only the sensors or each system element influences the SFs and their failure possibilities respectively, which are applicable for the relevant system or sub-system.

The following structure analysis, see **Figure 16** illustrates an example of the defined hardware structure, Category 2 PL d for the ‘first boom hydraulic’ and corresponding SFs. The structure analysis in **Figure 16** shows that the sensors trigger the SFs, the Logic/PLC controls the components, the test equipment monitors the sensors (how and how often), and the components which are responsible for the SFs.

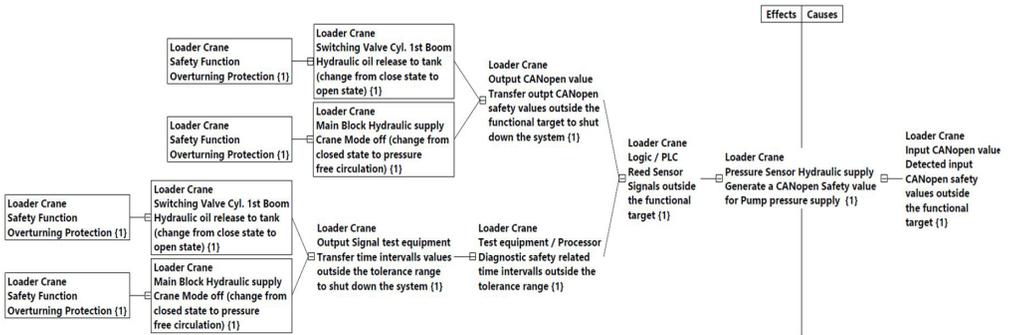
Figure 16: Proposed structure analysis, safety-related solution III.



With this representation of the sub-system ‘first boom hydraulic’, the associated functions and failure networks become very clear. **Figure 17** shows a simplified example of a function network with the focus on the pressure sensor of the ‘main block hydraulic supply’, which triggers the SF *Overturning Protection*. The function network builds up the hardware structure of the Category 2 PL d with the two shutdown paths. The sensor signal (e.g. outside functional target) as the causes, the Logic/PLC as the controls of components, the test equipment as a diagnostic part, the valves as actuators and as an add-on, e.g. for the SF *Overturning Protection*.

In the standard FMEA process each implemented sensor, every involved actuator and every SF in the complete loader crane system, must be connected into the function network with each other. The failure network is generated in the same way. In order to simplify the process structure, the function and failure networks can be created separately for each SF, which can then be linked together.

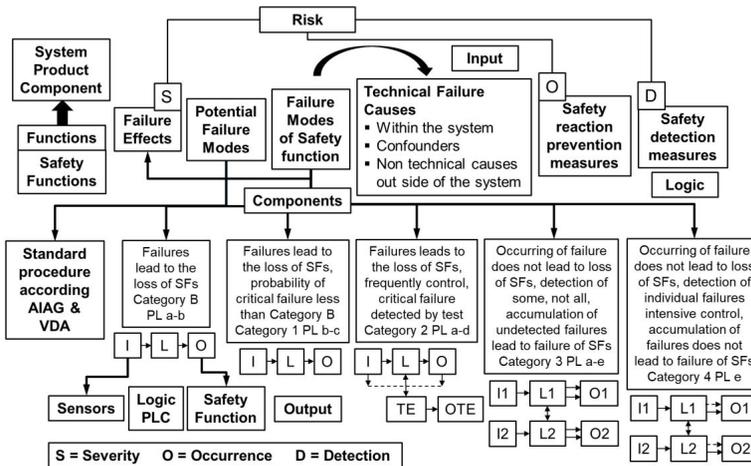
Figure 17: Proposed function network - Pressure sensor hydraulic supply - SF "Overturning Protection Category 2 PL d".



*Fourth method of safety-related solution:*

The fourth safety-related solution also divides the Failure Modes into non-safety related and safety-related Failure Modes. The difference to the other solutions is that all SFs and their corresponding categories are integrated into the failure sequence chain see **Figure 18**. The clear structure of the failure sequence chain thus simplifies the structure analysis and provides a good overview.

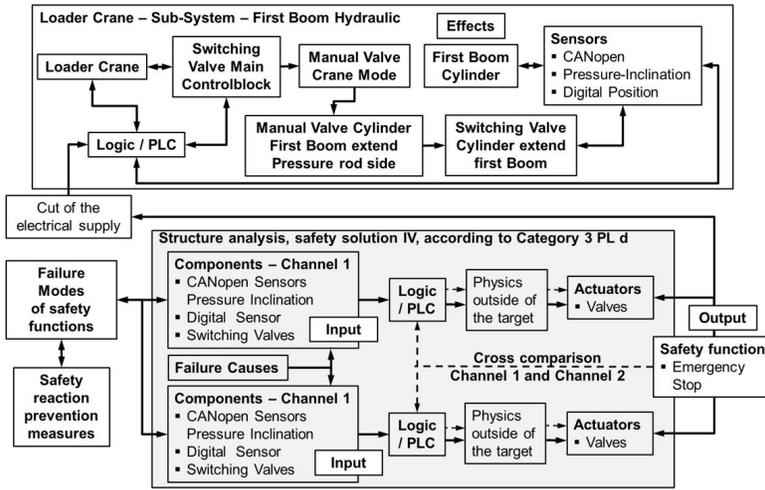
Figure 18: Proposed safety-related solution IV, according to ISO 26262 [7], with modified structure to ISO 13849 [1] [2].



With this solution, the SFs are displayed directly with their associated category in the structure. The following example of a structure analysis see **Figure 19** shows the Category 3 PL d for the SF *Emergency Stop*. For this SF and depending on the focus of the failure causes, all involved components which are responsible for the subsystem 'first boom hydraulics' trigger the individual input. The SF as an add-on switches off the

system depending on the output signals from the Logic/PLC. The structure analysis **Figure 19** illustrates the redundant functionality of the Category 3 PL d. The specified parameters and requirements for the Category 3 PL d controlled by the Logic/PLC cut off the electrical supply if failures occur in channel 1 and channel 2 at the same time or when affecting the same function.

Figure 19: Proposed structure analysis, safety-related solution IV.

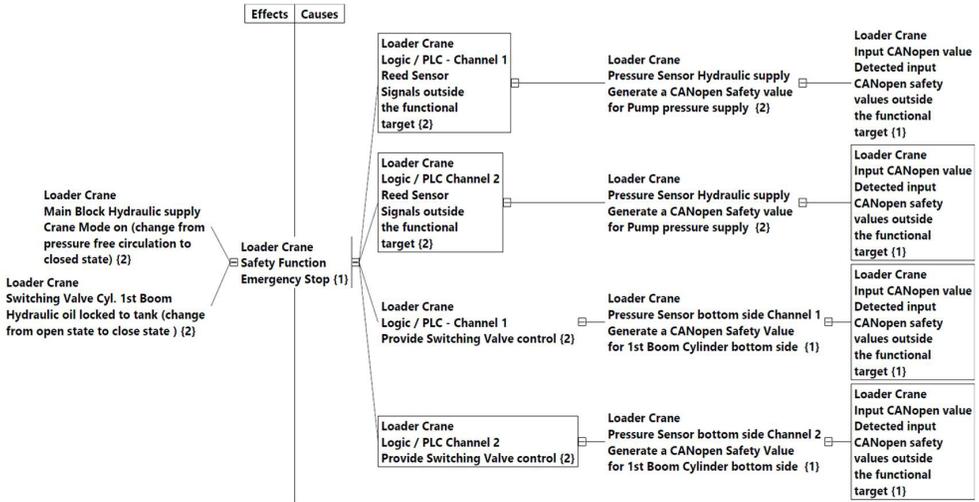


When combined in one FMEA structure, the number of subsystems and the number of the defined SFs with different categories can easily make it very complex to build up a function and failure network including the non-safety-related functions, and the safety-related functions.

**Figure 20** shows the proposed function network as a simplified example for the SF Emergency Stop, for the pressure sensor 'hydraulic supply' and the pressure sensor of the switching valve 'cylinder bottom side' of the sub-system 'first boom hydraulics' the proposed function network. Because all involved components on each sub-system influence the SF Emergency Stop, it is necessary to generate the function network for each component and for each sub-system, which triggers the SF.

For clear structuring, it is recommended to first create the individual function and failure networks of the responsible components for the SF Emergency Stop and then to combine these individual networks accordingly.

Figure 20: Proposed function network - Pressure sensor hydraulic supply - SF “Emergency Stop Category 3 PL d”.



#### 4 EVALUATION AND RESULTS

Four possible methods answer the question:

“How to integrate the defined SFs and the corresponding categories within the structure of the FMEA process?”

**Figure 21** compares the four different methods, starting with a combination of a safety-related solution and a non-safety-related solution with the emphasis on the safety-related perspective, but with a complex FMEA structure when combined. The first and the fourth solution illustrate that the SFs are realized as preventive and detection measures. The second solution only looks at the safety-related parts and the SFs are realized as detection measures. Therefore, it has a clear structure in the function and failure networks. In the third and the fourth method, the SFs are supplemented as an add-on. Systematic four shows a fully integrated approach with a clear overview of the defined categories for all involved SFs, see **Figure 18**, but also includes a complex FMEA structure.

Figure 21: Comparison of the methods.

Comparison of possible safety-related solutions	First solution	Second solution	Third solution	Fourth solution
<b>Various solutions</b>				
Safety-related solution	x	x	x	x
Non-safety-related solution (Standard System FMEA)	x	possible	x	x
Combination of safety-related and non-safety-related solution (Standard System FMEA)	possible		possible	possible
<b>Safety Functions</b>				
Safety function as an add-on			x	x
Safety function as Prevention Measures	x			x
Test equipment with Outputs as Detection Measures	x	x	x	x
<b>Category B, 1, 2, 3, 4 with corresponding hardware structure</b>				
Integrated into the function and failure network		x	x	x
<b>Failure Modes</b>				
Divided the Failure Modes into safety-related and non-safety-related solution	x	x		x
<b>Failure Causes</b>				
Failure causes divide in different variants		x		
<b>Structure of the function and failure networks</b>				
Complicated structural design	x		x	x
Clear structural design		x		

**Figure 22** compares the advantages of the possible solutions based on the evaluation criteria. The practical implementation of the favoured third method can then be carried out as shown in for the example of the loader crane.

Figure 22: Evaluation criteria for possible solutions.

Evaluation criteria for the possible solutions Comparing the benefits	First solution	Second solution	Third solution	Fourth solution
Presentation of the categories into the FMEA process basically to be realized	-	+	++	++
Implementation into the structure feasible	+	+	+	+
Can be used as a starting point for functional analysis	+	+	+	+
Graphical representation of the scope of observation depended on a combination of safety-related and non-safety-related functions	+ -	+	++	--
Adaption of evaluation criteria out of the FMEA-MSR possible	+	+	+	+
Can be used for various mobile machine systems	+	+ -	++	++

## 5 CONCLUSION AND OUTLOOK

These methods not only apply to the one particular hydraulic mobile machine presented. Generally, they apply to all hydraulic mobile machines, which are a combination of a vehicle with a separate machine, such as loader cranes, fire trucks, truck-mounted concrete pumps or mobile cranes. The research using the loader crane example shows that separating the mobile machine and vehicle allows implementing the safety function and the corresponding categories into the FMEA structure.

For other mobile working machines, e.g. graders, wheel loaders or wheeled excavators where separation is not possible and where street approval must also be taken into account, the entire process must be re-examined to show whether the proposed approach can be applied as well. Therefore, the following question arises again:

“How to integrate SFs, corresponding categories and street approval with their risks within the structure of the FMEA process?”

## 6 NOMENCLATURE

<i>AIAG</i>	Automotiv Industry Action Group
<i>ASILs</i>	Automotive Safety Integrity Levels
<i>DC</i>	Diagnostic Coverage
<i>DIN</i>	German institute for standardization
<i>EN</i>	European Standard
<i>F</i>	Frequency
<i>FMEA</i>	Failure Mode and Effects Analysis
<i>MSR</i>	Monitoring and System Response
<i>HARA</i>	Hazard And Risk Analysis
<i>ISO</i>	International Organisation for Standardization
<i>MTTF<sub>d</sub></i>	Mean Time To dangerous Failure
<i>P</i>	Possibility
<i>PFH<sub>d</sub></i>	Probability of dangerous Failure per Hour
<i>PL</i>	Performance Level
<i>PL<sub>r</sub></i>	Performance Level required
<i>PLC</i>	Programmable Logic Controller
<i>PTO</i>	Power take off
<i>S</i>	Serverity
<i>SRP/CS</i>	Safety-Related Parts of Control System
<i>SRS</i>	Safety Requirements Specification
<i>T</i>	Torque
<i>VDA</i>	German Association of the Automotive Industry

## REFERENCES

- [1] DIN EN ISO 13849-1, Safety of machinery – Safety related parts of control systems – Part 1: General principles of design (ISO 13849-1:2015).
- [2] DIN EN ISO 13849-2, Safety of machinery – Safety related parts of control systems – Part 2: Validation (ISO 13849-2:2012).

- [3] DIN EN ISO 12100, Safety of machinery – General principles for design – Risk assessment and risk reduction (ISO 1200:2010).
- [4] Barg J, Eisenhut-Fuchsberger F, Orth A, Ost J, Springhorn C (2012) 10 steps to performance level, Bosch Rexroth Group.
- [5] Yang, Chia-Feng, (2010) Mechanics Based Design of Structures and Machines.
- [6] AIAG & VDA, FMEA Handbook (2019), Failure Mode and Effect Analysis, AIAG.
- [7] ISO 26262, Road vehicles – Functional Safety – (ISO 26262:2011-11-15).
- [8] von Regius B (2006) Qualität in der Produktentwicklung – Vom Kundenwunsch bis zum Fehlerfreien Produkt, Carl Hanser.
- [9] DIN EN 12999, Cranes – Loader cranes; (DIN EN 12999:2013-02+A2:2012).
- [10] DGUV IFA Report (2/2017) Functional Safety of machine controls.
- [11] kVA by UL, technical and management consulting group focused on functional safety and ISO 26262 standards.
- [12] Schellbach A, Dörfel L (2019) Gesamtheitliche Betrachtung mittels der FMEA.

## CAPÍTULO 22

### REACCIÓN DE ESPECIES FORESTALES DE ULTRA-RÁPIDO CRECIMIENTO A PODA TOTAL, EN ESTEPA ESPINOSA MONTANO BAJO, ECUADOR

Data de aceite: 27/02/2023

#### R. A. Ramos Veintimilla<sup>1</sup>

Docente de Titulación  
Escuela de Ingeniería Forestal  
Facultad de Recursos Naturales  
Escuela Superior Politécnica de  
Chimborazo. Panamericana Sur km 1½  
Riobamba, Ecuador. EC060155

#### A. S. Guanaga Paredes

Escuela de Ingeniería Forestal  
Facultad de Recursos Naturales  
Escuela Superior Politécnica  
de Chimborazo

#### F. A. Sigcha

Estación Experimental Santa Catalina  
Instituto Nacional de Investigaciones  
Agropecuarias

#### F. M. Romero Mancero

Agencia Ecuatoriana de Aseguramiento  
de la Calidad del Agro  
Distrito 3 Riobamba

**RESUMEN:** El propósito de la investigación consistió en estudiar la respuesta de

*Paulownia elongata*, *P. fortunei* y un híbrido (*Paulownia fortunei* x *elongata*) a un sistema de recepa y evaluar el desempeño de los brotes juveniles, como estrategia para confirmar su adaptabilidad a las condiciones bioclimáticas de estepa espinosa Montano Bajo. El ensayo se instaló en diciembre del 2015, en una plantación clonal de dos años de edad, plantada por INIAP y ESPOCH en la granja Tunshi, Ecuador. Se establecieron 9 bloques por especie para un total de 27 parcelas experimentales, con 9 observaciones por parcela neta. El tratamiento silvicultural ejecutado fue poda de renovación/recepa, realizando un corte del tallo en bisel a dos centímetros de altura desde el suelo. Las variables evaluadas fueron: Días a la brotación, número de brotes por tocón, diámetro a la base del brote y altura del brote. Los tres materiales estudiados respondieron positivamente a la práctica silvicultural, 90% de tocones brotados a los 61 días de haber realizado el ensayo. A los 29 días de la recepa ya se encontraron brotes epicórmicos en las tres especies de *Paulownia*, presentando entre 1 y 13 brotes por tocón. En crecimiento dasométrico, *P. fortunei* experimentó el mayor promedio en altura (81,85 cm), seguida por *P. elongata* (70,51 cm) y *Paulownia* híbrido (65,53 cm), siendo 3,5 veces mayor a los promedios de altura y 4 veces mayor en diámetro a la altura de la base del tallo, de los reportados en el primer año de evaluación. Estos resultados avizoran probables comportamientos adecuados

<sup>1</sup> Correspondencia, móvil 0999110240, raul.ramos@esPOCH.edu.ec (R. A. Ramos Veintimilla)

y adaptación como una especie forestal-agroforestal de interés para características similares del sitio de estudio.

**PALABRAS CLAVE:** Recepa. Poda. Silvicultura. Dendroenergía.

## REACTION OF ULTRA-FAST GROWING FOREST SPECIES TO TOTAL PRUNING, IN SPINY STEPPE MONTANO BAJO, ECUADOR

**ABSTRACT:** This study is aimed to evaluate the response *Paulownia elongata*, *P. fortunei* and hybrid (*Paulownia fortunei x elongata*) to renewal pruning system and evaluate to develop the juvenile sprout of plants as a strategy to assess its adaptability to the bioclimatic conditions of thorny steppe Montano Bajo, Ecuador. The essay was install in December, 2 015 in one clonal plantation two years old, establish by INIAP and ESPOCH in Tunshi farm, Ecuador. This was established in nine blocks per species for a total of 27 experimental plots with nine observations per net plot. The selviculture treatment executed was renewal pruning, making a bevel cut stem two feet high from the ground. The variables evaluated were: Days sprouting, number of sprouts per stump diameter at the base of the outbreak and height of the outbreak. The three materials studied responded positively to silvicultural practice and 90% of erupted stumps at 61 days responded to development essay. At 29 days from the development the recepa presented epicormics sprout in the three Paulownia species; *P. fortunei* experienced the greatest average height (81,85 cm), followed by *P. elongata* (70,51 cm) and hybrid Paulownia (65,53 cm), being 3,5 times greater than the average height and 4 times greater in diameter at the base than those reported in the first year evaluation, these results foresee probable behaviors adapted and adequate as a forestry-agroforestry species of interest from the site of study

**KEYWORDS:** Recepa. Pruning. Silviculture. Wood energy.

### 1 INTRODUCCIÓN

La deforestación y degradación de los bosques, constituyen dos de los mayores problemas ambientales a nivel mundial. Las estadísticas forestales en el Ecuador revelan 9 599 678,7 hectáreas de bosques existentes (34,7 % de la superficie nacional), de los cuales el 98,5% son bosques naturales, en tanto que las plantaciones no superan el 1,5% restante del patrimonio forestal (1). Estas cifras sumadas y comparadas con el uso potencial del suelo, sugieren que en el país existe un déficit de cobertura forestal de aproximadamente 2,0 a 2,5 millones de hectáreas (1,2).

Esa reducción sistemática de los bosques nativos, ha sido provocada por una irracional explotación de los recursos forestales para distintos fines y usos, pero sobre todo para la industria de la madera, siendo el proceso de colonización, el eje principal mediante el cual se evidenció transferencia de tierras para uso agropecuario en detrimento de tierras con aptitud forestal (3).

En el país, tradicionalmente se viene explotando plantaciones de especies forestales de rápido crecimiento, introducidas y nativas, entre estas algunas especies

de eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labill., *E. urophylla* S.T. Blake X *E. grandis* W. Mill ex Maiden, *E. saligna* Sm.), pachaco (*Schizolobium parahiba* Vell. S.F. Blake), melina (*Gmelina arborea* Roxb.), laurel (*Cordia alliodora* Ruiz & Pav.), pinos (*Pinus radiata* D. Don, *P. patula* Schlttdl. & Cham), y balsa (*Ochroma pyramidale* Cav. ex Lam. Urb.), sin embargo, el aprovechamiento intensivo de estas especies ha provocado pérdida de su reducida base genética, cuyos individuos sobresalientes se han tornado cada vez más escasos para cubrir la demanda interna y externa de madera de aserrío, industrial o energía de biomasa (4, 5, 2, 6, 7, 8, 9, 10, 11). Lo indicado, ha obligado a agendar la necesidad de buscar nuevas especies forestales con atributos de crecimiento rápido, como potenciales alternativos para contribuir a las crecientes demandas forestales del país.

*Paulownia* es un género forestal perteneciente a la familia *Paulowniaceae* (12). Nueve especies de este género son originarias de China, a excepción de *P. fortunei* (Seem.) Hemsl, que se extienden hasta Vietnam y Laos, mientras que *P. tomentosa* (Thunb.) Steud crece en Corea y Japón (13). De estas, las especies más utilizadas para proyectos forestales son *P. elongata* S. Y. Hu, *P. fortunei* y *P. kawakamii* T. Itô en razón de sus características de crecimiento rápido (14). Son árboles que se cultivan hace más de 2 600 años, pero que empezaron a ser estudiados a partir de 1 972 por el investigador forestal de origen chino (13, 14). Estos árboles empezaron a ser desarrollados genéticamente a comienzos de la década de 1990, mediante la evaluación de su adaptación a distintos climas a fin de promover su cultivo en el mundo, tanto para reforestación como para uso maderable y energético. Actualmente presenta una amplia distribución, desde el este de Asia –principalmente en Japón y Corea, pasando por Indonesia, Estados Unidos (Carolina del Norte y del Sur, California, Indiana y Kentucky) e India, hasta México y Brasil en América Latina (15, 16).

En sitios adecuados los árboles presentan gran porte, fuste recto, cilíndrico, de color grisáceo, con suaves estrías longitudinales y casi nunca presentan nudos; un árbol de diez años de edad puede alcanzar volúmenes aproximados de 4, 0-4,5 m<sup>3</sup>, con crecimientos anuales en DAP de 3 a 4 cm (13, 14). Tales atributos, se manifiestan en la excelente calidad y belleza de su madera, su considerable producción de biomasa y capacidad de fijación de CO<sub>2</sub>, potencial de aprovechamiento del follaje para el ganado, y también para programas de reforestación de tierras abandonadas y/o degradadas, además de sus atributos ornamentales (16). *Paulownia* sp, se adaptan a una gran variedad de climas, llegando a soportar mínimas absolutas de -20 °C y máximas absolutas de 45 °C, su rango óptimo de temperaturas se encuentra entre 24 °C y 29 °C de temperatura media diaria (13). En relación a la altitud, el rango que normalmente ocupa esta especie varía entre los 600 y 1 500 metros sobre el nivel del mar (17).

La Presidencia de la República del Ecuador en enero 2 013 manifestó el interés por explorar la introducción y evaluación de la adaptación de especies forestales foráneas con atributos de **Crecimiento Rápido**, particularmente por especies del género *Paulownia* spp, como potenciales alternativas para contribuir a las prioridades políticas contempladas en el Plan Nacional de Forestación y Reforestación Productiva (4). Por lo cual el INIAP auspiciado por la SENESCYT, en mayo del 2 013, inició el proyecto de investigación “Adaptación de especies forestales de rápido crecimiento del género *Paulownia* spp a diversos ambientes bioclimáticos y suelos del Ecuador”, donde uno de los sitios de investigación del proyecto fue estepa espinosa Montano Bajo (Granja Experimental Tunshi-ESPOCH), en éste sitio, en su evaluación inicial se observó una defoliación total de las plantas, asociado con una pérdida de dominancia apical y posterior crecimiento vigoroso de yemas axilares, características indeseadas para árboles de producción de madera sólida. Por este motivo se desarrolló el presente estudio, que tiene como objetivo estudiar la respuesta de tres especies forestales del genero *Paulownia* spp a podas de renovación y comportamiento de los brotes juveniles, como estrategia para evaluar y confirmar su adaptabilidad a las condiciones bioclimáticas de estepa espinosa Montano Bajo.

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 DESCRIPCIÓN DEL SITIO

El estudio se llevó a cabo entre diciembre del 2 015 y marzo del 2 016, en un experimento plantado por el INIAP-ESPOCH en diciembre del 2014, en la granja experimental Tunshi de la ESPOCH, ubicada en el km 4 de la vía Riobamba-Licto con coordenadas proyectadas UTM **X**=671167,34E, **Y**=9878372,68N. La temperatura media anual es de 13,8 °C con una precipitación media anual de 835,6 mm, la altitud es de 2 700 msnm. El sitio corresponde a estepa espinosa Montano Bajo (18).

### 2.2 DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO

Las especies estudiadas fueron *Paulownia elongata*, *P. fortunei* y el híbrido (*P. elongata* \* *P. fortunei*), introducidas desde los Estados Unidos de Norte América y establecidas en 9 bloques por especie para un total de 27 parcelas experimentales, con 9 observaciones por parcela neta. El tratamiento silvicultural consistió en realizar una poda de renovación, realizando un corte inclinado/corte en bisel a dos centímetros de altura desde el suelo a cada uno de los arbolitos que comprenden cada una de las parcelas

netas ( $n=9$ ), posterior a la poda se aplicó con una brocha una pasta de oxiclورو de Cu en el corte, para evitar el ingreso de patógenos y se etiquetaron cada uno de los individuos en estudio, para poder diferenciarlos entre ellos y registrar la información. Posteriormente se realizó un raleo de rebrotes, seleccionando el rebrote dominante, basándose en características morfológicas como fuste recto, vigoroso, sin daños mecánicos y sin incidencias de plagas. El número de rebrotes que se dejaron en el tocón fue uno, tomando en cuenta el diámetro y distribución en éste.

## 2.3 METODOLOGÍA DE TOMA DE DATOS

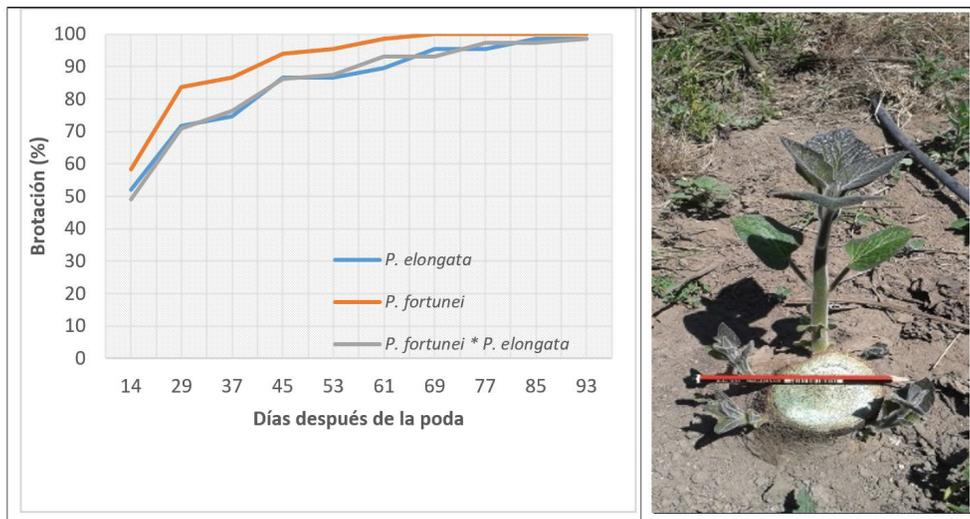
Las variables evaluadas fueron: **Días a la brotación**, esta evaluación fue visual determinando la presencia de los rebrotes en cada uno de los tocones y se reportó en porcentaje de tocones brotados a la fecha de evaluación. **Sobrevivencia de rebrotes**. La sobrevivencia se evaluó en base al número de rebrotes vivos que se observaron a los 61 días de realizado la poda, utilizando la metodología de (19, 20), quien indica que un porcentaje de sobrevivencia superior al 80% corresponde a categoría buena, entre 40 y 80% de sobrevivencia corresponde a categoría regular, y porcentaje de sobrevivencia menos de 40 por ciento corresponde a categoría mala. **Número de rebrotes por tocón**, mediante observación directa se registraron el número de brotes presentes en el tocón (en cada individuo podado) y se reportó en promedio de brotes por unidad de observación. **Diámetro a la base del rebrote**, esta variable se registró a partir de que el brote alcanzó 15 cm de altura y fue seleccionado presentando las mejores características morfológicas; para asegurarse que todas las mediciones se realicen en el mismo sitio se ejecutó una marca con pintura, a dos centímetros de la inserción del rebrote en el tocón y con una forcípula graduada se midió en dos direcciones (N-S y E-W) el diámetro de éste (Fig. 1), sus datos se registraron en centímetros. **Altura del rebrote/eje**, se registró el crecimiento del rebrote midiendo desde la inserción en el tocón hasta la yema terminal a lo largo del fuste (21) para lo cual se utilizó una cinta métrica graduada en centímetros (Fig. 2), y se reportó en la misma unidad. Todas estas variables se evaluaron con una frecuencia de 8 días a partir de los 15 días de haber realizado la poda. Los datos se analizaron, dependiendo de la variable, usando medidas de tendencia central y análisis de medidas repetidas en el tiempo para las variables dasométricas, así como separación de medias Duncan al 5%, en el programa InfoStat® versión 2 014.

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 DÍAS A LA BROTAÇÃO Y SOBREVIVENCIA DEL REBROTE

El análisis estadístico realizado para porcentaje de brotación de *Paulownia* como efecto a la poda de restauración, no encontró diferencias estadísticas para las especies en estudio en ninguna de las fechas evaluadas. Sin embargo, la Fig. (1) indica los porcentajes de brotación en los diferentes períodos, es así que las tres especies en estudio se encontraron rebrotadas alrededor del 55% de tocones a los 14 días de realizado la poda de restauración, porcentajes que se fueron incrementando hasta los 45 días de haber realizado dicha práctica silvicultural alcanzando entre el 78 y 87% de tocones rebrotados, a los 61 días después de la poda en las tres especies se encontró más del 90 % de tocones rebrotados. Aunque las diferencias son numéricas, se observa cierta superioridad en la brotación en *P. fortunei*, respuesta que probablemente está relacionada con el diámetro del tocón de la planta podada, ya que esta especie presentó el 90 % de los individuos un diámetro del tocón superior a 3 cm, mientras que las otras especies presentaron el 80% de los individuos con éstas características. Junto a la figura 1 se observa una fotografía de un tocón de *P. fortunei* a los 29 días después de la poda. Aunque la literatura reporta estudios extremadamente limitados en recepa de *Paulownia*, los resultados de brotación y sobrevivencia encontrados en esta investigación corresponden a la categoría de buenos (19) quien indica que un porcentaje de sobrevivencia superior al 80% corresponde a categoría buena, entre 40 y 80% de sobrevivencia corresponde a categoría regular, y porcentaje de sobrevivencia menos de 40 por ciento corresponde a categoría mala; así como también (21, 22) en un estudio de rebrotes en *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh reportaron sobrevivencia del 88%. Otros investigadores (23), reportan valores mayores (57,34 %) de mortalidad de rebrote, en un estudio de la capacidad de rebrote de *Leucaena macrophylla* Benth, valor considerado como aceptable según menciona (24) para las especies de género *Leucaena* sp.; por su parte (25) en un estudio del crecimiento y rendimiento de biomasa aérea de rebrotes de dos años en cultivos dendroenergéticos, reportaron sobrevivencia de 84% para *E. globulus*, 60 % para *E. denticulata* y 30% para *Acacia delabata*. La mortalidad de rebrotes se debe probablemente a que la planta al ser podada entra en estrés fisiológico lo que tiende a generar nuevos ejes en mayor cantidad, con el fin de restablecer los procesos de fotosíntesis y transpiración. Una vez generada la nueva cobertura foliar, tiende a eliminar los ejes con menor grado de desarrollo o de menor aporte energético (la generación de azúcares por producto de la fotosíntesis es baja), lo cual incide que la mortalidad aumente de un 40 a 60 % (26).

Figura 1. Porcentaje de brotación en tocones durante los primeros 93 días de evaluación de *Paulownia* sp (*P. elongata*, *P. fortunei* e híbrido, *P. elongata* \* *P. fortunei*). Tunshi-ESPOCH.



### 3.2 NÚMERO DE BROTES POR TOCÓN

A partir de los 14 días de realizado la poda de restauración ya se encontraron brotes epicórmicos en las tres especies de *Paulownia* estudiadas (Fig. 1), mismos que presentaron entre 1 y 9 brotes por tocón (Tabla 1), alcanzando su número máximo de brotes a los 29 días de haber realizado la práctica silvicultural, de éstas la especie que mayor número de brotes presentó fue el Híbrido (*P. elongata* x *P. fortunei*) alcanzando un número entre 1 y 13 (Tabla 1). La capacidad de rebrote de las especies estudiadas se encuentra categorizada como excelente para *Paulownia* híbrido y bueno para *P. fortunei* y *P. elongata* (27) excelente corresponde a 10 o más rebrotes, bueno de 5 a 9,5 rebrotes, aceptable de 3 a 4,9 rebrotes y malo menos de 2,9 rebrotes. En estudios similares en *Leucaena macrophylla* Benth (23), reportaron promedios de 1,78 a 4,68 rebrotes/planta, evaluado en estación lluviosa y seca; datos similares reportan (28) con especies arbóreas perennes tropicales, encontrando que un aumento de los rebrotes en época seca es una respuesta mecánica al estrés hídrico que presenta la planta. Así como también (29) en un estudio de la capacidad de rebrote en clones híbridos de *Populus* encontraron entre 12 y 13,5 rebrotes / planta y Un árbol podado al no tener copa en presencia de déficit hídrico, debe desarrollar una nueva cobertura foliar que permita generación de azúcares y el intercambio gaseoso para la sobrevivencia del individuo.

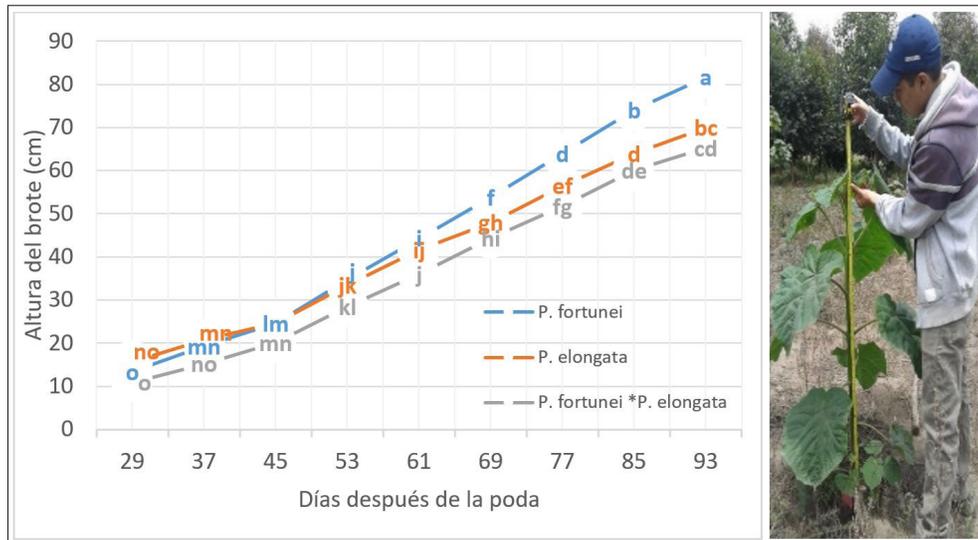
Tabla 1. Rango de número de brotes por tocón de *Paulownia* sp. Tunshi-ESPOCH.

<b>Especie</b>	<b>Días después de la poda de restauración</b>			
	<b>14 días</b>	<b>29 días</b>	<b>37 días</b>	<b>45 días</b>
<i>P. elongata</i>	1 - 7	1 - 9	1 - 9	1 - 9
<i>P. fortunei</i>	1 - 8	1 - 8	1 - 8	1 - 8
<i>Paulownia</i> Híbrido	1 - 9	1 - 13	1 - 13	1 - 13

### 3.3 ALTURA DEL BROTE

El análisis estadístico realizado para altura del brote identificó diferencias altamente significativas ( $p$ -valor = 0,0008) para la interacción “especies \* tiempo de evaluación”. En la Fig. (2) se muestran las tendencias del crecimiento de las tres especies de *Paulownia* en estudio durante los 93 días de evaluación y su respectiva separación de medias. Donde se puede observar que Duncan al 5% agrupa a las alturas del brote en varios rangos de clasificación, identificando a *P. fortunei* como la especie de mayor crecimiento promedio (81,85 cm), seguida por *P. elongata* (70,51 cm) y *P. fortunei* \* *P. elongata* (65,53 cm). Estos crecimientos experimentados en las tres especies, después de los 60 días de haber iniciado la brotación fueron 3,5 veces mayor a los promedios de altura de planta reportados por (30) en un período similar en el primer año de evaluación. Las especies evaluadas han presentado crecimientos nunca reportados para especies forestales en la zona de estudio. Los datos encontrados en esta investigación superan en por lo menos el 50 % a los reportados por (24) en un estudio del crecimiento y rendimiento de biomasa aérea de rebrotes en cultivos dendroenergéticos, presentando alturas del rebrote de 230 cm para *E. globulus*, 180 cm para *E. denticulata* y 140 cm para *Acacia delabata* en dos años de edad; así como también, al promedio de 50 cm de altura de planta de *Leucaena macrophylla* Benth, reportado por (23) y promedios de 117,28 cm de altura para *Lonchocarpus minimiflorus* durante los 6 meses de evaluación.

Figura 2. Crecimiento semanal de altura del brote de *P. fortunei*, *P. elongata* y *P. fortunei* \* *P. elongata* bajo el efecto de poda de renovación. Tunshi-ESPOCH (Duncan 5%).



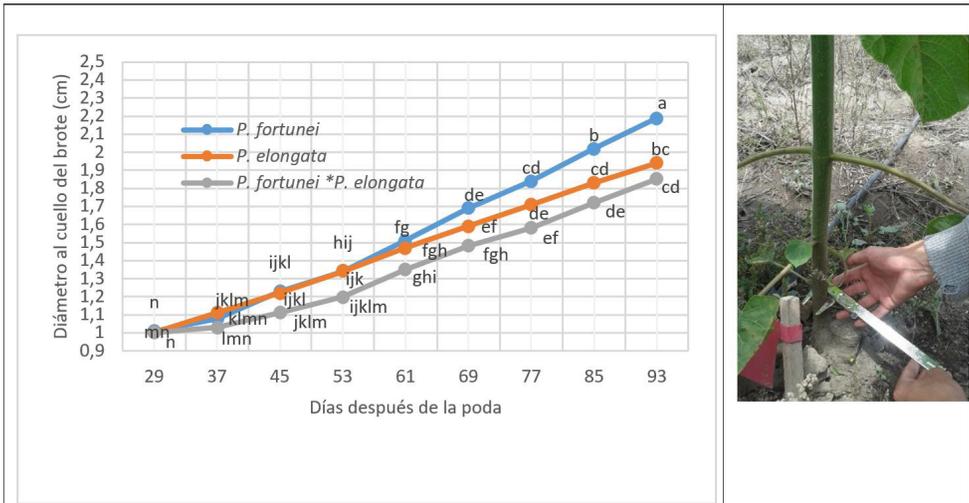
### 3.4 DIÁMETRO A LA BASE DEL BROTE

El diámetro del brote a la base del eje-tallo (dos centímetros de la inserción del tocón), en las especies en estudio, experimentaron tendencias similares a la variable altura del brote, mostrando diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ) para especies en el tiempo evaluado, dicha diferencia se observa con mayor claridad a partir de los 69 días de haber realizado la poda de restauración. En la Fig. (3) se muestran las tendencias de crecimiento del diámetro a la base para las tres especies durante los 93 días de evaluación, donde se puede observar que *P. fortunei* presenta el mayor promedio 2,2 cm de Incremento Medio Semanal (IMS), seguido por *P. elongata* (1,95 cm) y finalmente *P. fortunei* \* *P. elongata* (1,85 cm). Al igual que en la variable altura del brote, probablemente las especies están respondiendo a la adaptación en el sitio, en razón de que luego de la práctica silvicultural las especies presentaron un diámetro a la base del eje 4 veces superior al experimentado en el primer año de establecimiento del experimento, durante un mismo período de comparación (30).

Esta mayor vigorosidad en altura y en diámetro a la base del tallo se explica por la menor competencia al existir un solo rebrote seleccionado, lo que significa que, si continúa este comportamiento, probablemente a una misma edad de rotación este tratamiento obtendrá un producto de mayores dimensiones comerciales, tendencia similar manifiesta (31) en su investigación “Monte Bajo, opción para tres especies de Eucaliptos en segunda rotación, un caso en la provincia de Osorno, Décima Región, Chile”. Así como también

(23) en un estudio de rebrote de *Leucaena macrophyla* Benth, reportan un crecimiento diamétrico de 0,12 cm por semana, y (32) reportan crecimientos de 0,13 cm por semana en la especie *Lonchocarpus minimiflorus* promedio experimentado en una investigación de la capacidad de rebrote de especies arbóreas del bosque seco Secundario de Nandarola, Nandaime, Granada (33).

Figura 3. Crecimiento semanal de diámetro a la base del brote de *P. fortunei*, *P. elongata* y *P. fortunei* \* *P. elongata* bajo el efecto de poda de renovación. Tunshi-ESPOCH (Duncan 5%).



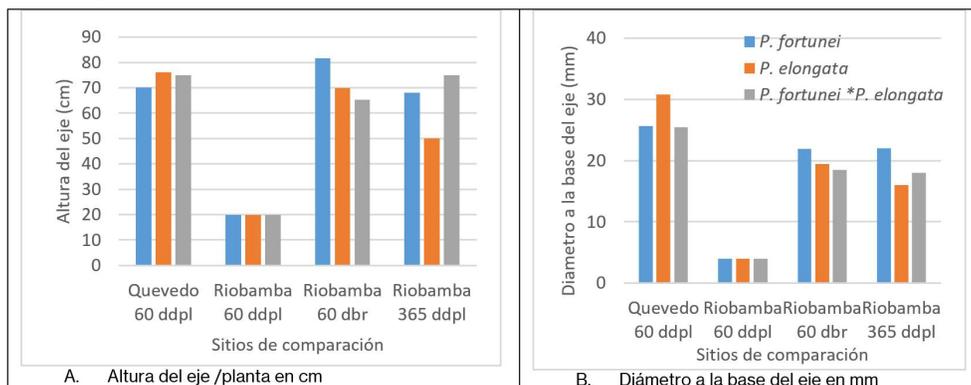
### **Comparativo de variables de crecimiento dasométrico de Paulownia spp entre sitios experimentales de Ecuador.**

En la Fig. (4) se presentan los datos de variables de crecimiento dasométrico como son: Altura del eje/planta en cm (Figura 4A) y diámetro a la base del eje en mm (Figura 4B) de tres especies de Paulownia evaluadas en dos sitios contrastantes de Ecuador (Quevedo = bosque húmedo Tropical, y Riobamba = estepa espinosa Montano Bajo) (31); adicionalmente se hace una comparación del comportamiento de dichas variables y especies forestales en el sitio Riobamba, con la particularidad de que la segunda evaluación se realiza dos años después de la plantación, luego de haber aplicado una práctica silvicultural (poda de renovación), como una estrategia para reconfirmar su adaptación de las especies al sitio.

La altura promedio del eje de *Paulownia* experimentado en el sitio Quevedo, 60 días después de la plantación (33), fue parecida a la expresada en Riobamba 60 días después de la brotación, posterior a la poda de renovación practicada (74 cm), y ésta fue 2,5 veces superior al crecimiento promedio presentado en el sitio Riobamba 60 días

después de la plantación; se puede observar también que el crecimiento promedio en altura en los 60 días después de la brotación fue ligeramente superior al crecimiento en el mismo ensayo a los 12 meses de plantado (Fig. 4A).

Figura 4. Comportamiento de variables dasométricas de *P. fortunei*, *P. elongata* y *P. fortunei* \* *P. elongata* de sitios experimentales en Ecuador (Datos tomados de Guilcapi, 2015 y Guzmán, 2015. **60 ddpl** = 60 días después de la plantación y **60 ddr** = 60 días después de haber rebrotado).



Para la variable diámetro a la base del eje (Fig. 4B), se observa tendencias similares a las experimentadas en altura del eje/planta, e inclusive al comparar los datos registrados en el sitio de Riobamba, el promedio a los 60 días después de la poda de restauración fue 4 veces superior a los promedios expresados a los 60 días después de la plantación (4 mm en 60 días después de la plantación Vs 20 mm 60 días después de rebrotado).

El comportamiento de las variables de crecimiento dasométrico experimentado por las tres especies estudiadas en el sitio estepa espinosa Montano Bajo, luego de la práctica silvicultural (poda de restauración) advierte un grado interesante de adaptación de las especies al sitio (suelo, clima), sin embargo no es un tiempo suficiente de evaluación para llegar a conclusiones concretas, por lo que hay la necesidad de seguir evaluándoles a los brotes por lo menos los 9 meses siguientes, y con esos datos llegar a conclusiones más confiables.

#### 4 CONCLUSIONES

- Bajo las condiciones de sitio (clima y suelo) estepa espinosa Montano Bajo, las tres especies de *Paulownia* respondieron positivamente a la poda de renovación, en razón de que, a los 61 días de haber podado, en las tres especies se encontró más del 90 % de tocones brotados, esto nos indica la capacidad de rebrote de las especies y por tanto el potencial que demuestran

para programas de clonación, aseveración que lo ratifica la literatura en varias publicaciones.

- Al comparar el comportamiento de las variables dasométricas a los 60 días después de la práctica silvicultural y al año de plantación, sin la práctica silvicultural, se registró una superioridad en altura de 3.5 veces y en diámetro de 4 veces en favor de la poda de recepa, mostrándose ésta como un tratamiento silvicultural favorable para evaluar procesos de adaptación de especies latifoliadas como lo es *Paulownia*.
- El efecto de la práctica silvicultural sobre el comportamiento de las variables dasométricas de las tres especies de *Paulownia* evaluadas en estepa espinosa Montano Bajo, fue similar al efecto obtenido en bosque húmedo Tropical sin la práctica silvicultural en un período análogo de evaluación, lo que avizora probables comportamientos adecuados como una especie de interés para éstas características de sitio.
- Los datos de variables dasométricas registrados en los 93 días posteriores a la práctica silvicultural indicados en la presente investigación, muestran que las especies de *Paulownia* responden favorablemente a la poda de renovación en estepa espinosa Montano Bajo; a decir de los datos, **son crecimientos nunca alcanzados por ninguna especie forestal en el sitio.**

## 5 RECOMENDACIONES

Investigar las posibles causas de la alta heterogeneidad en el crecimiento de los individuos de un mismo clon, poner mucha atención en las tres especies de *Paulownia*, sobre todo en *P. fortunei* y dar seguimiento de por lo menos dos períodos estacionales, donde los nuevos brotes reciban condiciones de estrés propias del sitio y sus respuestas permitan llegar a conclusiones convincentes sobre la adaptación de las mismas. Si continúan dichos comportamientos probablemente podrían ser especies de importancia socioeconómica y ambiental para las condiciones de sitio evaluadas.

## 6 AGRADECIMIENTOS

Dejamos nuestro sincero agradecimiento al INIAP Santa Catalina por permitirnos desarrollar esta investigación en su ensayo de adaptación y a la Escuela de Ingeniería Forestal de la ESPOCH por aprobarnos y autorizar dicha investigación como un tema de práctica preprofesional de la Ing. Andrea Guanga.

## 7 CONFLICTO DE INTERESES

No existe ningún tipo de conflicto en razón de que la información generada en la investigación es para apoyo de quienes puedan necesitar en beneficio técnico científico.

## REFERENCIAS

1. Carrión, D.; Chiu, M. 2011. Documento del Programa Nacional REDD. Sexta reunión de la Junta Normativa del Programa Nacional ANU- REDD. Disponible en: [www.unredd.net/index.php?option=com\\_doeman&task=doe](http://www.unredd.net/index.php?option=com_doeman&task=doe).
2. Grijalva, J.; X. Checa; R. Ramos; P. Barrera; R. Vera; F. Sigcha. 2016. Estado de los recursos genéticos forestales en Ecuador. Programa Nacional de Forestería del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias. INIAP, Quito. 100 p.
3. FAO. 2010. Global Forest Resources Assesment 2010. Main Report. FAO. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/013/i1757e/i1757e.pdf>
4. MAE. 2011. Programa de Naciones Unidas para la reducción de las emisiones por deforestación y degradación del bosque en los países en desarrollo Documento del programa nacional Conjunto. Sexta reunión de la junta normativa Del programa ONU-REDD. 21 - 22 de marzo De 2011. Da lat, Vietnam.
5. Delgado, J.; P. Játiva. 2010. Políticas institucionales de Investigación, Transferencia de Innovaciones y Prestación de Servicios Tecnológicos, Quito, Ecuador INIAP, Dirección General, Dirección de Planificación y Economía Agrícola, 52 p. Publicación miscelánea No 154.
6. Limongi, R.; G. Wiracocha; C. Yopez. 2011. Amarillo de Guayaquil (*Centrolobium ocoxylum* Rose ex Rudd) especie de uso múltiple del bosque seco del Ecuador. INIAP, Portoviejo. 32 p.
7. Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca. 2013. Programa de incentivos para la reforestación con fines comerciales. Guayaquil, Ecuador.
8. Lascano, M. 2008. Valoración de la contribución forestal a la economía nacional, caso Ecuador. OTCA. Ecuador.
9. Palacios, W.; E. Vásquez; N. Jaramillo; M. Robalino. 2011. Evaluación de la estrategia de Desarrollo forestal Sustentable 2006-2011. Ministerio del Ambiente del Ecuador, Quito. 66p.
10. Prado, L.; C. Samaniego; J. Ugarte-Guerra. 2010. Estudio de las cadenas de abastecimiento de germoplasmas forestal en Ecuador. World Agroforestry Centre (ICRAF), Lima. 247 p.
11. Ramos Veintimilla, R. A.; A. M. Cárdenas Rubio; R. R. Vera Vélez; J. R. Limongi Andrade y J. E. Grijalva Olmedo. 2018. Propagación in vitro de tres especies del género *Paulownia* bajo el sistema de propagación convencional. Quebracho 25 (1,2):69-79. Argentina.
12. García-Lahera, J. P. 2010. Guía de facilitación para el trabajo con la literatura de referencia sobre la flora de Cuba. Editorial Feijóo, Cuba.
13. Zhu, Z. H.; C. J. Chao; X. Y. Lu; Y. G. Xiong. 1986. *Paulownia* in China: cultivation and utilization. Beijing, China.

14. Lucas, M.; E. Martínez; F. López; M. Abellán; F. García. 2011. El cultivo forestal de *Paulownia* spp: Primeros resultados de si aplicación en Castilla La Mancha. Universidad de Castilla La Mancha, Escuela superior de Ingenieros Agrónomos de Albacete y Departamento de Ciencias y tecnología Agroforestal y Genética.
15. Gutiérrez, J.; Ocaña R. 2009. Manual para el Cultivo de *Paulownia elongata*. Disponible en: [http://www.uaemex.mx/SIEA/editorial/2009/09\\_C\\_422\\_0643.pdf](http://www.uaemex.mx/SIEA/editorial/2009/09_C_422_0643.pdf)
16. Wayne, K.; Donald, G. 2004. Tree Crops for Marginal Farmland. *Paulownia*. Practical guide from the University of Tennessee. 31 pp.
17. Castellanos, O.; A. Rodríguez; J. Rodríguez; B. Rodríguez. 2006. Organogénesis indirecta y enraizamiento "in vitro" de "*Paulownia elongata*". Redalyc 4(15):1-12.
18. Rivas, F., Alarcón, A., Espinosa, C., Carrillo, F., Villamarín, D. (2005). Formaciones vegetales en el Ecuador, Escuela Politécnica del Ejército, Facultad de Ciencias Aplicadas. Pichincha –Ecuador.: Escuela de Ingeniería en Biotecnología Sangolquí.
19. Centeno, M. 1993. Inventario Nacional de Plantaciones Forestales de Nicaragua. 85 p.
20. ADEFOR (Asociación de Desarrollo Forestal y Agropecuario de Occidente). 1995. Comportamiento de 25 procedencias de 3 especies forestales del género *Eucalyptus* (*E. camaldulensis* Dehn, *E. maculata* Hook. F. y *E. tereticornis* Sm.) En Chancay (Cajamarca, Perú). Informe de investigación N° 5. 24 p.
21. González, B; Silva, C; Salgado, O. 2008. Evaluación de la capacidad de rebrotes de dos especies arbóreas en el bosque tropical seco, Nandarola Pacífico Sur. Universidad Nacional Agraria. Managua, NI. 8(11):57-61.
22. Reyes, F.; Membreño, J.; Chávez, Y. 2013. Evaluación de variables dasométricas de rebrotes en *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh, en la finca el Plantel, Nindiri, Masaya. La Calera Revista científica. 13 (20). 39-45.
23. Flores-Pinot, D., Janeth-Sorto, T., Gutiérrez-Bardales, J., Arias-Aguilar, D., Valverde, J. C., & Mora- Molina, J. (2018). Capacidad de rebrote de *Leucaena macrophylla* Benth con fines dendroenergéticos en Cortes, Honduras. Revista Forestal Mesoamericana Kurú, 16(38), 47-54. Doi. 10.18845/rfmk.v16i38.3995
24. Singhala, A.; Kumarb, M.; Bhattacharyab, M.; Kumaric, N.; Kumar, P.; Devendra, J.; Chauhanalndu, K.; Thakur, S. 2018. Pretreatment of *Leucaena leucocephala* wood by acidified glycerol: optimization, severity index and correlation analysis, Bioresource Technology, vol. 265, pp. 214-223.
25. Ríos, J. 2017. Evaluación del crecimiento y rendimiento de biomasa aérea en rebrotes de cepas de dos años en cultivos dendroenergéticos. Tesis para optar al grado de doctor en ciencias forestales. Universidad de Concepción-chile.
26. Nassara, R.; Nermeen, F. T.; Redac, M. 2015. Active yeast extract counteracts the harmful effects of salinity stress on the growth of leucaena plant. Scientia Horticulturae, vol. 30, pp. 61-67.
27. Díaz, G. 2005. Establecimiento y evaluación de cercas vivas en Pacora, San Francisco Libre. Trabajo de diploma. UNA. Managua, Nicaragua. 27 p.
28. Reda, F.; Maximous, S.; El-Kobisy, O. 2000. Morphological and anatomical studies on leucaena (*Leucaena leucocephala*) plants grown under stress of different levels of salinity in irrigation water. Bull. Fac. Agric. Cairo Univ, vol. 4, pp. 309-330.

29. Plaza del Pino, J. 2011. Evaluación de la capacidad de rebrote en clones híbridos de *Populus* destinados a la producción de biomasa para energía. Trabajo fin de carrera Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Forestal. Universidad Politécnica de Madrid. 140 pp.
30. Guilcapi, D. 2015. Estudio de adaptabilidad de tres especies forestales, del genero *Paulownia* (*P. fortunei*, *P. elongata* e Híbrido entre *P. fortunei* \* *P. elongata*). A las condiciones de sitio estepa espinosa de Tunshi, Cantón Riobamba, Provincia de Chimborazo. Tesis para optar al grado de Ingeniero Agrónomo. Facultad de Recursos Naturales. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo-Ecuador. 106 pp.
31. Geldres, E.; Schlatter, J.; Marcoleta, A. 2004. Monte Bajo, opción para tres especies de Eucaliptos en segunda rotación, un caso en la provincia de Osorno, Décima Región, Chile. Revista Bosque 25(3) 57-62.
32. Salgado, O.; Silva, Z. 2008. Evaluación de la capacidad de rebrote de dos especies arbóreas del bosque seco secundario de Nandarola, Nandaime, Granada. Ingeniería thesis, Universidad Nacional Agraria, UNA.
33. Guzmán, L. 2015. Estudio de adaptabilidad de tres especies forestales, del genero *Paulownia* (*P. fortunei*, *P. elongata* e Híbrido entre *P. fortunei* \* *P. elongata*). A las condiciones de sitio Bosque húmedo Tropical de la Estación INIAP-Pichilingue, Cantón Quevedo, provincia de los Ríos. Tesis para optar al grado de Ingeniero Agrónomo. Facultad de Recursos Naturales. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo-Ecuador. 105 pp.

### INFLUENCIA DE LA PARED CELULAR EN LA DENSIDAD DE LA MADERA DE ROBLE (*Quercus robur* L.)<sup>1</sup>

Data de submissão: 18/01/2023

Data de aceite: 03/02/2023

#### Guillermo Riesco Muñoz

Universidad de Santiago de Compostela  
Departamento de Ingeniería Agroforestal  
Escuela Politécnica  
Superior de Ingeniería  
Lugo (España)

<https://orcid.org/0000-0002-9830-7398>

#### Andrés Remacha Gete

Universidad Politécnica de Madrid  
Escuela Técnica Superior de  
Ingeniería de Montes,  
Forestal y del Medio Natural  
Madrid (España)

<https://orcid.org/0000-0003-2967-6998>

**RESUMEN:** Una de las variables que se utilizan para caracterizar la madera es su densidad, que varía entre especies arbóreas, entre árboles de una misma especie y entre zonas de un mismo árbol, dependiendo esta variación de factores genéticos y ambientales. En el presente trabajo se determinó la densidad de la madera (densidad aparente, incluyendo las paredes celulares y los poros)

<sup>1</sup> Una versión preliminar de este trabajo fue presentada al 7º Congreso Forestal Español, celebrado en 2017 en Plasencia (España) y organizado por la Sociedad Española de Ciencias Forestales.

y la densidad exclusivamente de la pared celular (solamente el tejido leñoso, excluyendo los poros o espacios vacíos), para conocer cómo influye la densidad de la pared celular en la densidad aparente de la madera. El resultado obtenido permite orientar sobre qué fuentes de variación manipular para reducir la variabilidad de la densidad, logrando una madera más homogénea, y por ello más apta para la industria, en cuanto a densidad y en cuanto a otras variables relacionadas con esta. Para el estudio se dispuso de una muestra de 200 probetas prismáticas de madera de roble, pequeñas y sin defectos, obteniéndose una densidad de la pared celular de 1.343 kg/m<sup>3</sup>, valor inferior al que recogen las referencias bibliográficas consultadas. En contra de lo que suele aceptarse en la bibliografía, la densidad de la pared celular no es constante, presentando un coeficiente de variación del 5,1 % en la muestra analizada, valor inferior al coeficiente de variación de la densidad aparente, lo que indica que la abundancia de poros (porosidad) constituye una fuente de variación de la densidad aparente. Se observaron diferencias significativas de densidad entre los árboles de los que procedía la muestra. A pesar de la existencia de referencias en torno a la mayor densidad de la madera de duramen frente a la madera de albura, no se detectaron estas diferencias en la madera de roble analizada.

**PALABRAS CLAVE:** Densidad anhidra. Densidad básica. Densidad de la pared celular. Porosidad. Propiedad física.

## INFLUENCE OF THE CELL WALL ON THE DENSITY OF OAK WOOD (*Quercus robur* L.)

**ABSTRACT:** A variable used to characterize wood is density, which varies depending on the species, exhibiting also inter-tree and intra-tree variation for a species. The variation depends on genetic and environmental factors. In this study, the apparent density of wood (bulk density, including cell walls and pores) and the cell wall density (only woody tissue, excluding pores, i. e. void spaces) were determined to analyze how the cell wall density influences the apparent density of wood. The result obtained allows guidance on which sources of variation to manipulate to reduce density variation, for achieving a more homogeneous wood, more suitable for the industry, in terms of density and in terms of other density-related variables. A sample of 200 prismatic defect-free oak wood specimens were available for the study, obtaining a cell wall density of 1,343 kg/m<sup>3</sup>, lower than the values in the reviewed references. Contrary to what is usually accepted in the literature, cell wall density is not constant, showing a coefficient of variation 5.1% in the sample analyzed, a value lower than the coefficient of variation of the bulk density, which indicates that the abundance of pores (porosity) constitutes a source of variation of the bulk density. Significant differences in density were observed between the sampled trees. Despite the existence of references about higher density of heartwood compared to sapwood, differences were not detected in the analyzed sample of oak wood.

**KEYWORDS:** Oven-dry density. Basic density. Cell wall density. Porosity. Physical property.

### 1 INTRODUCCIÓN

Las propiedades de la madera varían debido a factores principalmente genéticos (especie arbórea, región de procedencia, individuo) y en menor medida varían a causa de factores ambientales, que influyen en el metabolismo del árbol, en las características anatómicas del tejido leñoso que produce y, por tanto, indirectamente afectan a las propiedades de la madera. Entre las características anatómicas que influyen en las propiedades de la madera están la edad del cambium, el grado de duraminización de la madera y la anchura de los anillos de crecimiento.

Una de las variables que suelen determinarse para caracterizar la madera es su densidad, debido a que es una propiedad estrechamente relacionada con otras características físicas y mecánicas del material, lo cual hace de la densidad un valioso índice de calidad de la madera con vistas a su utilización en la industria. Así mismo, el conocimiento de la densidad facilita las transacciones comerciales en metros cúbicos o en toneladas. Por último, la densidad es una variable sencilla de obtener.

Para la caracterización de la madera suele emplearse la densidad aparente, que se calcula como cociente entre la masa y el volumen de la madera, considerando el volumen total de la misma, tanto el que ocupan las paredes celulares como el que ocupan los poros (los espacios constituidos por los lúmenes celulares y los meatos intercelulares). Los poros se encuentran llenos de aire cuando la humedad de la madera no supera el

punto de saturación de la pared celular, que varía normalmente entre el 25 y el 35 % según GUTIÉRREZ y PLAZA (1967). Cuando la humedad de la madera supera el punto de saturación de la pared celular los lúmenes celulares comienzan a llenarse de agua, hasta quedar completamente ocluidos cuando la humedad de la madera alcanza un máximo teórico que viene dado por la expresión siguiente:

$$H_{max} = 1.000 \frac{100 + C_v}{\rho_0} - \frac{100.000}{\rho_{PC}} \quad (1)$$

donde  $H_{max}$  es la humedad máxima que puede albergar la madera, expresada en porcentaje,

$C_v$  es la contracción volumétrica total, expresada en porcentaje,

$\rho_0$  es la densidad aparente en estado anhidro, expresada en kilogramos por metro cúbico,

$\rho_{PC}$  es la densidad de la pared celular en estado anhidro expresada en kilogramos por metro cúbico.

Para determinar la densidad de la pared celular en estado anhidro se puede hacer uso de la expresión (1), despejando en la misma la densidad de la pared celular:

$$\rho_{PC} = \frac{100.000}{1.000 \frac{100 + C_v}{\rho_0} - H_{max}} \quad (2)$$

Una vez conocida la densidad de la pared celular se puede calcular la porosidad de la madera en estado anhidro, como volumen de la madera ocupado por poros respecto del volumen total de la madera, expresado en porcentaje. La ecuación que permite calcular la variable porosidad ( $P$ ) es la siguiente:

$$P = 100 - 100 \frac{\rho_0}{\rho_{PC}} \quad (3)$$

En consecuencia, la densidad aparente de la madera depende de la densidad de la pared celular, de la abundancia de poros y del contenido de humedad de la madera. Para un nivel determinado de humedad en la madera sería deseable conocer qué fuentes de variación afectan a la densidad de la pared celular y compararlas con las fuentes de variación (factores genéticos y ambientales) que afectan a la densidad aparente.

La determinación de los factores que afectan a la variación de la densidad de la pared celular es el primer paso para intervenir sobre dichos factores con vistas a obtener madera de densidad más uniforme y una madera más uniforme es más apta como materia prima en la industria de transformación. Esto es particularmente útil en el caso

de la madera de roble, cuyo empleo debe asentarse en un conocimiento detallado de sus propiedades físicas y mecánicas (METTEM y RICHENS, 1991), ya que es un material de propiedades muy variables, que dependen de componentes hereditarios, de la estación forestal y de los tratamientos selvícolas recibidos (ÁLVAREZ *et al.*, 2000).

## 2 OBJETIVOS

Se pretende conocer las fuentes de variación de la densidad de la pared celular y cómo influye ésta en la densidad aparente de la madera. Esto ayuda a decidir sobre qué fuentes de variación intervenir para reducir la variabilidad de la densidad de la pared celular y de la densidad aparente, logrando una madera más homogénea en cuanto a densidad y en cuanto a otras variables relacionadas con la densidad.

## 3 METODOLOGÍA

Para obtener el material necesario para el estudio se seleccionó una muestra de 28 robles (*Quercus robur* L.) procedentes de diversas localizaciones de Galicia, que presentaban un amplio rango dimensional (desde 6 hasta 51 cm de diámetro normal y desde 5 hasta 23 m de altura total). El diámetro normal de los árboles de la muestra se midió con forcípula de  $\pm 0,5$  cm de precisión y la altura total con hipsómetro Blume-Leiss con precisión de  $\pm 0,5$  m.

Los ejemplares fueron apeados y de cada uno de ellos se extrajeron rodajas de la sección transversal completa a diferentes alturas en el tronco: en la base, a 1 m de altura, a 2 m de altura, etc. hasta obtener en algunos ejemplares rodajas a 9 m de altura. Se pretendía obtener rodajas tan arriba como fuera posible en el fuste, para hacer así más apreciable la previsible tendencia de la densidad a lo largo del tronco. No obstante, no se pudo obtener rodajas a alturas superiores a 9 m ya que el pequeño diámetro de los fustes a mayor altura imposibilitaba la extracción posterior de las probetas de ensayo normalizadas que se requieren para la medida de la densidad.

Las rodajas fueron labradas en carpintería para obtener probetas prismáticas de dimensiones nominales  $4 \times 2 \times 2$  cm y  $2 \times 4 \times 4$  cm (dimensión longitudinal  $\times$  dimensión radial  $\times$  dimensión tangencial). De entre las probetas labradas se escogieron 200 que estuvieran libres de defectos anatómicos aparentes. El análisis sobre probetas de pequeñas dimensiones sin defectos permite caracterizar la madera de una especie y comparar madera de diversas procedencias ya que la presencia de defectos o singularidades en la madera es una fuente de variación que impediría detectar la influencia de otros factores en las propiedades del material. Las probetas sin defectos fueron sumergidas en agua

durante varios meses hasta alcanzar la humedad máxima y en ese estado se determinó su peso con precisión de centésima de gramo junto con su volumen a saturación, obtenido como producto de las tres dimensiones principales del prisma medidas con precisión de centésima de milímetro. También se determinó en cada probeta la anchura de anillos de crecimiento y la presencia o ausencia de albura. Una vez fuera del agua las probetas se estabilizaron a la humedad del laboratorio antes de llevarlas a desecación en estufa a 103 °C. Sobre la muestra en estado anhidro se volvieron a medir pesos y volúmenes por el procedimiento ya indicado.

Con los datos de peso y volumen en ambos estados (saturado de humedad y anhidro) se obtuvieron las siguientes variables:

- contracción volumétrica (diferencia entre volumen saturado y volumen anhidro, como porcentaje del volumen anhidro)
- densidad anhidra (masa anhidra entre volumen anhidro)
- densidad básica (masa anhidra entre volumen saturado)
- humedad máxima
- densidad de la pared celular en estado anhidro (con la ecuación 2) y
- porosidad (con la ecuación 3).

Para el análisis estadístico de los resultados se empleó la hoja de cálculo Microsoft Excel 2010 y el programa estadístico IBM SPSS Statistics versión 25.

## 4 RESULTADOS

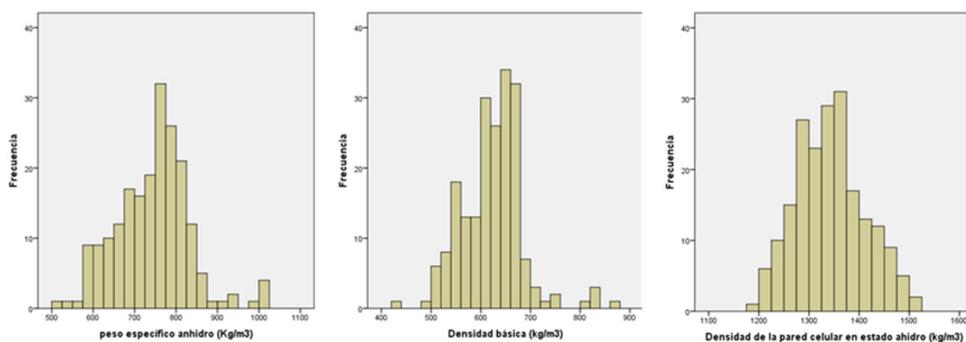
Los resultados obtenidos para las variables analizadas se encuentran en la tabla 1 y en la figura 1. La anchura de anillos de crecimiento toma un valor medio que es propio de una especie de crecimiento lento, con una variabilidad esperable dada el amplio rango diamétrico y estacional de los árboles muestreados. La humedad máxima es superior al 100 % en parte de las probetas, lo cual se explica ya que la porosidad es también superior al 50 % en algunos casos. Así mismo, humedad máxima y porosidad presentan un coeficiente de variación similar, debido a ser variables muy relacionadas. La densidad anhidra y la densidad básica informan de una madera pesada, que presenta una variación esperable para una propiedad gravimétrica según la norma UNE 56528:1978 (AENOR, 1978a). La contracción volumétrica en este caso es tan solo una variable instrumental necesaria para determinar la densidad de la pared celular mediante la ecuación (2). No obstante, los resultados de contracción volumétrica para la muestra informan de una madera que presenta gran contracción ante los cambios de humedad, según el criterio de interpretación dado por la norma UNE 5640:1978

(AENOR, 1978b), siendo además una variable sujeta a gran variabilidad según la norma UNE 56528:1978 (AENOR, 1978a).

Tabla 1. Estadísticos descriptivos de las propiedades físicas determinadas sobre la muestra de 200 probetas de madera de pequeñas dimensiones sin defectos de roble (*Quercus robur* L.).

	Mínimo	Máximo	Media	CV (%)
Anchura de anillos (mm)	1,0	9,9	2,8	47
Humedad máxima (%)	46	155	87	16
Densidad anhidra (kg/m <sup>3</sup> )	516	1025	743	12
Densidad básica (kg/m <sup>3</sup> )	427	860	623	10
Contracción volumétrica (%)	10,0	34,7	19,1	23
Densidad de la pared celular (kg/m <sup>3</sup> )	1.186	1.521	1.343	5
Porosidad en estado anhidro (%)	26	59	45	13

Figura 1. Distribución de las variables analizadas en la madera de roble (n = 200).



Se obtuvo una densidad para la pared celular en estado anhidro de 1.343 kg/m<sup>3</sup>, valor inferior a las referencias bibliográficas, que sitúan dicha densidad, para la mayoría de las maderas, entre 1.400 y 1.620 kg/m<sup>3</sup>, con una media de 1.560 kg/m<sup>3</sup> (REMACHA, 1993). Por otra parte, según FREAS (1995), la densidad de la pared celular es aproximadamente 1.500 kg/m<sup>3</sup>. Es llamativo en esta variable su gran uniformidad, a juzgar por su baja dispersión relativa (coeficiente de variación), inferior al coeficiente de variación obtenido para la densidad aparente (densidad anhidra y densidad básica). Como el factor humedad no es causa de variación en las variables gravimétricas consideradas, ya que estas se han obtenido en estado anhidro, hay que atribuir a la porosidad el hecho de que la densidad básica y anhidra presenten una variabilidad que no es explicada por una variable tan uniforme como la densidad de la pared celular.

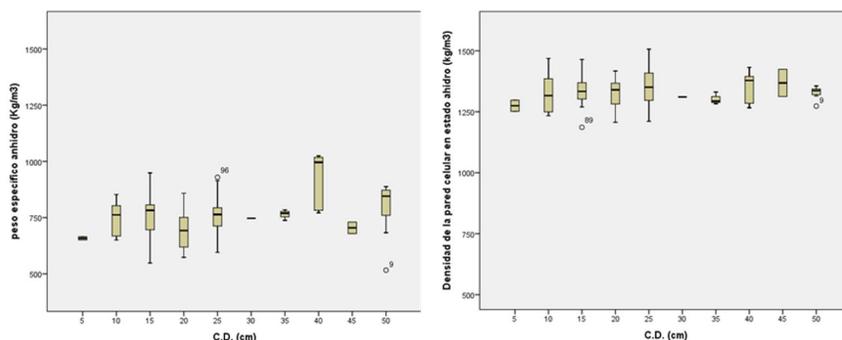
## 5 DISCUSIÓN

El análisis de la varianza (tabla 2) muestra que existen diferencias altamente significativas entre árboles para las tres variables de densidad y para la porosidad. Dado que el factor árbol influye en la densidad y en la porosidad se examinaron las correlaciones entre dichas variables y las variables dimensionales de los fustes, encontrándose que la densidad básica y la densidad anhidra no están relacionadas con la altura total del árbol del que procede la madera pero sí están altamente correlacionados con el diámetro normal, resultado esperable ya que el diámetro guarda relación con la edad, que afecta a la densidad de la madera. Sin embargo, la densidad de la pared celular es menos variable y no guarda relación significativa con la dimensión del árbol en la muestra analizada (figura 2).

Tabla 2. Análisis de la varianza con el factor árbol para las variables gravimétricas y la porosidad.

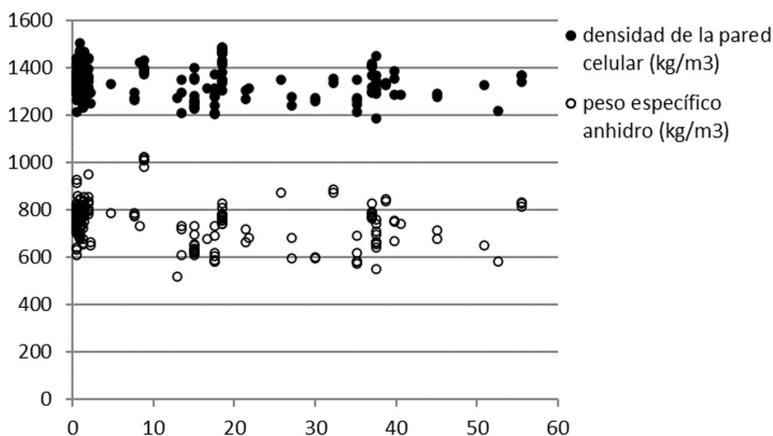
Fuente de variación		Grados de libertad	Media cuadrática	Significación
Densidad anhidra	Inter-grupos	27	33477,711	0,000
	Intra-grupos	172	3937,898	
	Total	199		
Densidad básica	Inter-grupos	27	16563,703	0,000
	Intra-grupos	172	1872,934	
	Total	199		
Densidad de la pared celular	Inter-grupos	27	11304,868	0,000
	Intra-grupos	172	3647,243	
	Total	199		
Porosidad	Inter-grupos	27	126,613	0,000
	Intra-grupos	172	16,290	
	Total	199		

Figura 2. Distribución de densidades con datos agrupados por clases diamétricas (C.D.) de los ejemplares de roble muestreados.



Las tres variables de densidad decrecen de forma significativa o altamente significativa a lo largo del fuste, aunque la cuantía de los coeficientes de correlación de Pearson son insuficientes como para justificar una propuesta de modelo de variación de la densidad según la posición en el fuste (figura 3).

Figura 3. Variación de la densidad de la madera de roble a lo largo del fuste (n = 200).



No se detectaron diferencias de densidad y porosidad entre probetas de duramen y de albura, lo cual es un resultado coincidente con trabajos anteriores, en los que la variación de densidad hallada entre albura y duramen se debe a diferentes contenidos de humedad en una y otra zona del fuste.

## 6 CONCLUSIONES

La variabilidad de la densidad aparente de la madera es principalmente atribuible a cambios en la porosidad ya que la densidad de la pared celular es muy uniforme. No obstante, la densidad de la pared celular mantiene el mismo patrón de variación que existe para la densidad aparente en numerosas especies forestales: diferencias altamente significativas entre árboles y tendencia a reducirse a medida que aumenta la altura en el fuste, resultados que puede ser debidos a la influencia de la edad cambial sobre la densidad, supuesto que habrá que contrastar en trabajos posteriores con madera de roble y con madera procedente de otras especies forestales, para comprobar así mismo si la densidad de la pared celular muestra una variación significativa entre especies.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AENOR. (1978a). *Norma UNE 56528:1978. Características físico-mecánicas de la madera. Preparación de probetas para ensayos*. Madrid: AENOR.

AENOR. (1978b). *Norma UNE 56540:1978. Características físico-mecánicas de la madera. Interpretación de los resultados de los ensayos*. Madrid: AENOR.

Álvarez, P.; Barrio, M.; Díaz, R.A.; Higuera, J.; Riesco, G.; Rigueiro, A.; Rodríguez, R.; Villarino, J. J. (2000). *Manual de silvicultura de frondosas caducifolias*. Lugo: Escuela Politécnica Superior.

Freas, A. D. (1995). Wood properties. En: Faherty, K. F.; Williamson, T. G. (eds.): *Wood engineering and construction handbook*. 1-29. New York: McGrawHill Inc.

Gutiérrez, A.; Plaza, F. (1967). *Características físico-mecánicas de las maderas españolas*. Madrid: Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias.

Mettem, C.J.; Richens, A.D. (1991). *Hardwoods in construction*. High Wycombe: Timber Research & Development Association.

Remacha, A. (1993). Humedad máxima de la madera y humedad final según usos. En: Remacha, A.; Chozas, A.; Álvarez, H.; Ortiz, J. (eds.): *Curso de secado de maderas Uruguay*. 287 pp. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.

# CAPÍTULO 24

## EMERGENCY REMOTE TEACHING IN PROCESS SIMULATION USING DWSIM: A CASE STUDY FROM DIQ-UMAG, CHILEAN PATAGONIA<sup>1</sup>

Data de submissão: 14/01/2023

Data de aceite: 03/02/2023

**Daniela Navarro-Pérez**

Departamento de Ingeniería Química  
Universidad de Magallanes  
Punta Arenas, Chile  
ORCID 0000-0001-5775-3300

**Juan C. Moreno-Díaz**

Departamento de Ingeniería Química  
Universidad de Magallanes  
Punta Arenas, Chile  
ORCID 0000-0002-0451-4071

**Pedro Simeone-Barrientos**

Departamento de Ingeniería Química  
Universidad de Magallanes  
Punta Arenas, Chile  
ORCID 0000-0003-4745-5240

**ABSTRACT:** Due to the worldwide COVID-19 pandemic, Chilean universities were forced to quickly change their face-to-face classes

<sup>1</sup> This paper was originally published at *Scientia et Technica* journal in 2022, available from: <https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/25065>

to online. In this context, the Department of Chemical Engineering (DIQ) of the University of Magallanes, Chile, seeks different Emergency Remote Teaching strategies for its students. This article reports the experience of delivering technical process simulation skills to their final year undergraduate civil chemical engineering students. Due to problems connecting externally with the commercial software Aspen HYSYS, housed at the university, the open-source software DWSIM was used as an alternative. The material content was adapted, and video tutorials were created to meet learning objectives. This software was taught in a new module inside the Project Engineering course to train the skills required for the students to design and simulate a chemical plant. We received positive feedback and constructive critics from the students through an anonymous survey and discussion forum. Subsequently, DIQ launched its YouTube channel named DIQ\_DWSIM with the videos made to the online community, positively impacting Spanish-speaking people who wish to learn to use DWSIM. As an indirect impact, two universities have used this channel as support material in their process simulation courses. A second survey was conducted on our YouTube audience resulting in the consolidation of this open online educational resource for higher education learning.

**KEYWORDS:** DWSIM. Process simulation. COVID-19. Remote emergency teaching. YouTube channel.

## ENSEÑANZA REMOTA DE EMERGENCIA EN SIMULACIÓN DE PROCESOS CON DWSIM: UN CASO ESTUDIO DIQ-UMAG, PATAGONIA CHILENA

**RESUMEN:** A causa de la pandemia COVID-19 en el mundo, las universidades Chilenas se vieron obligadas a cambiar sus clases presenciales a modalidad online en poco tiempo. En este contexto, el Departamento de Ingeniería Química (DIQ) de la Universidad de Magallanes, Chile, busca diferentes estrategias hacia una Enseñanza Remota de Emergencia para sus estudiantes. Este artículo reporta su experiencia en entregar las competencias técnicas de simulación de procesos a sus estudiantes de último de año de la carrera de pregrado ingeniería civil química. Debido a problemas para conectarse externamente con el software comercial Aspen HYSYS, alojado en la universidad, se enseña como alternativa el software de código abierto DWSIM. Se adaptaron las tutorías y se crearon video tutoriales para cumplir con los objetivos de aprendizaje establecidos. Este software se enseñó en un nuevo módulo dentro del curso de Ingeniería de Proyectos para entrenar a los estudiantes con las habilidades necesarias para diseñar y simular una planta química. Se recibió retroalimentación positiva y críticas constructivas de parte de los estudiantes a través de un foro de discusión y encuesta anónima. Posteriormente, el DIQ lanza su canal de YouTube DIQ\_DWSIM con los videos realizados a la comunidad online, logrando un impacto positivo en personas de habla español que deseen aprender utilizar DWSIM. Como impacto indirecto, dos universidades nos contactaron para utilizar nuestro canal como material de apoyo en sus cursos de simulación de procesos. Se realizó una segunda encuesta con nuestra audiencia de YouTube, resultando en la consolidación de este recurso educativo abierto online para el aprendizaje en educación superior.

**PALABRAS CLAVE:** Canal YouTube. DWSIM. COVID-19. Enseñanza remota de emergencia. Simulación de procesos.

### 1 INTRODUCTION

Educational institutions around the world have had to forcibly migrate from face-to-face or semi-face-to-face teaching to a complimentary online modality due to the COVID-19 pandemic in a short time. This transition has been challenging for the institutions and staff in public Latin American universities. The required technical and digital skills of teachers, together with institutional support, may be deficient. In addition, the internet connection speed and the availability of needed electronic devices (Cabero-Almenara and Llorente-Cejudo, 2020). The term that best describes teachers' rapid and unplanned migration is Emergency Remote Teaching (ERT), which has emerged as a definition coined by education experts to differentiate between assisted education and the immediate response towards an emergency education. A high-quality virtual education course at the university level requires 6 to 8 months of preparation. In contrast, the ERT is a response in which there is an initiation time of no more than one week, and in which adjustments are made on the fly as the content of the subjects progresses (Montes-Rodríguez, Villalobos-Benavides and Ruiz-Chaves, 2020).

This paper reports the case study of the Emergency Remote Teaching methodology implemented to acquire the technical skills of process simulation within the Project Engineering course. This course was conducted in the first academic semester of 2020 for the final year undergraduate degree students in Chemical Civil Engineering, Department of Chemical Engineering of the University of Magallanes (UMAG), Chile. The context, the teaching of the simulation of processes before the COVID-19 pandemic in the academic unit, the justification for selecting DWSIM as alternative software, the methodology applied to create a DWSIM module, and the development of video tutorials are described. The results obtained from an anonymous survey and discussion forum carried out with the students are reported; also, the impact of the launch of our YouTube channel DIQ\_DWSIM in the online community is outlined.

## 1.1 USE AND IMPORTANCE OF TEACHING PROCESS SIMULATORS IN CHEMICAL ENGINEERING

Currently, the higher education institutions that teach chemical engineering programs use different tools in their teaching. These generate added value to the training of students and the acquisition of key technical skills to be appropriately inserted in the workplace. The use of process simulators is an example of this, as an indispensable tool in the training of chemical engineers due to their ability to reinforce the knowledge students acquire during their study programs (De Jong and Van Joolingen, 1988). According to Haydari (2019, p.3): “in a complex problem, the solution of many thousands of equations is often required. Therefore, hand calculation of such problems in real time is practically impossible and process simulators are an irreplaceable tool”.

Therefore, modern teaching cannot be conceived without the use of a computer. Computers allow the resolution of complex calculations with speed and reliability in engineering so that companies dedicated to engineering design (e.g., aeronautical, automotive, chemical-industrial) have adopted programs computer-aided for their daily work and simulation design (Reyes Rodríguez, 2019). The learning process of simulation software requires an understanding of what is happening in it and how it uses different methods to solve chemical engineering problems. Learning for yourself how to use software simulation may not be the right fit. Therefore, it is essential how teachers train and present the tools and computational criteria used to interpret the results (Fernandes, 2002). Therefore, process simulation is one of the primary technical knowledge in the training of a chemical engineer. Through simulator-based learning, teachers use commercial software to simulate industrial chemical processes and thus reinforce the theoretical background of students, e.g., Ghasem (2016).

## 1.2 EDUCATIONAL LOCAL CONTEXT WITH THE COVID-19 PANDEMIC

The Department of Chemical Engineering - from now on DIQ - is geographically located in Punta Arenas city, capital of the Magallanes and Chilean Antarctic Region, part of the Chilean Patagonia. The regional population is approximately 166,553 people (INE, 2017), representing around 0.95% of the Chilean population. UMAG is the only state university in the region that offers 22 professional and 22 technical majors, with an average enrollment of 3,700 students. DIQ offers undergraduate programs in Chemical and Environmental Engineering and Chemical Civil Engineering, with a total average of 84 students, where, on average, 5 students per career graduate annually (UMAG, 2021). It is important to mention that we are located in an extreme area, with a geographical connection by land only through the Argentine territory or by sea, through ferries or, flying by air. This condition makes connectivity limited, making communication with other regions precarious and delaying the arrival of cutting-edge technology to improve the internet connection (Román, 2020).

On the other hand, the Chilean state universities in the last period have been affected by different student protests, causing them to reduce their teaching hours to finish the academic year. The UMAG is not immune to this, so, year after year, teachers and students have to plan how to complete their respective courses to meet the learning objectives. The year 2019 was affected by the student strike (El Magallánico, 2020), affecting the end of the second academic semester on April 30, 2020, and starting the 2020 academic year on May 4, 2020, two months later than usual (UMAG, 2020a). On March 3, 2020, the first case of contagion by COVID-19 (MINSAL, 2020a) was confirmed, and, on March 18, 2020, Chilean President Sebastián Piñera decreed the country to be in a state of catastrophe for 90 days, subsequently intermittently extended until the submission of this work (Prensa Presidencia, 2020a; 2020b; 2020c). On March 16, 2020, the UMAG (2020b) notified the student community that classes were starting online. Then, on April 1, 2020, the city of Punta Arenas began the first of four quarantines due to being one of the cities with the highest contagion rate in the country (MINSAL, 2020b).

## 1.3 PROCESS SIMULATION IN THE DIQ IN PRE-COVID-19 TIMES

Navarro-Pérez and Llerena-Chávez (2016) explain how process simulation is taught in the DIQ's chemical civil engineering program (see Fig. 1). In semester X (fifth year), the teaching of chemical process simulation begins in Computational Process Simulation. This course is divided into two central units: programming in Microsoft Excel

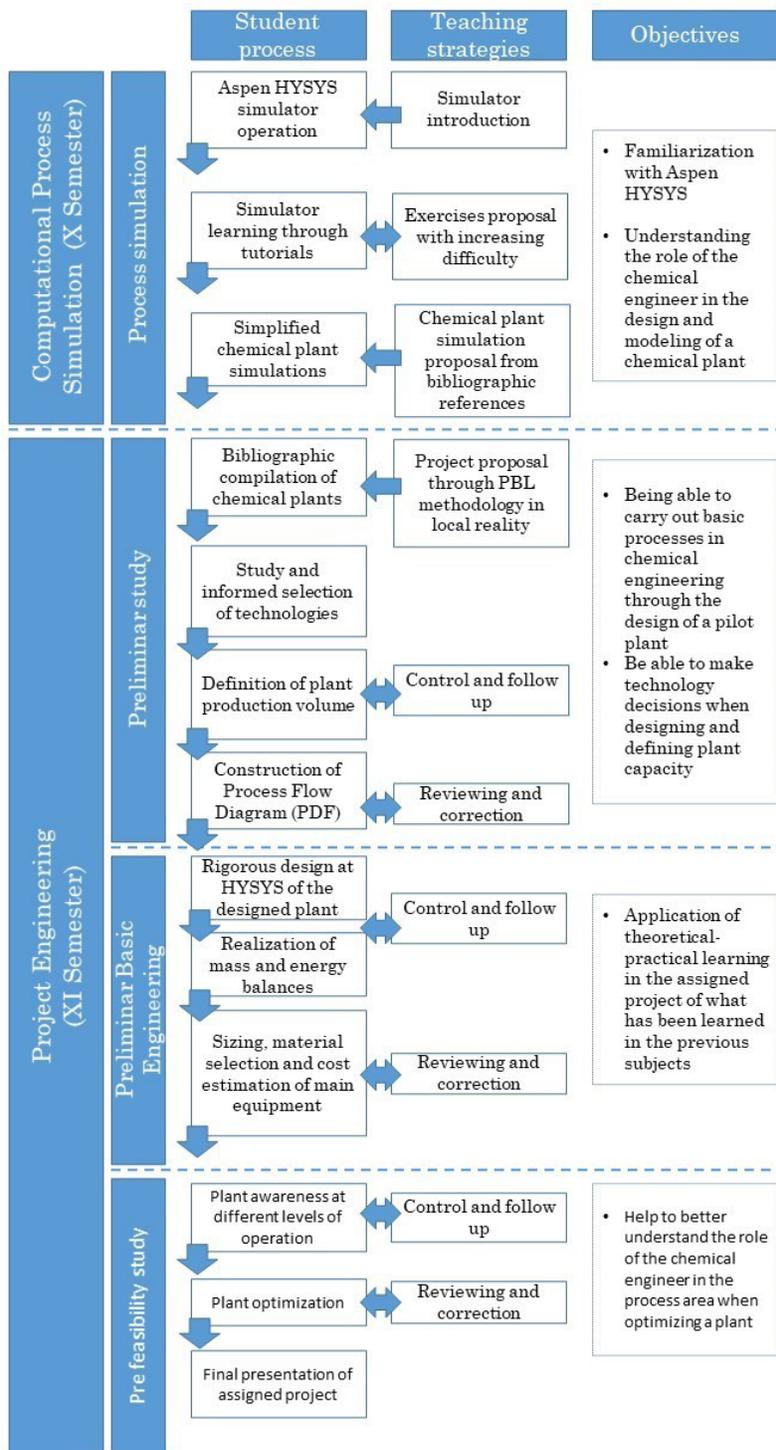
using the Visual Basic for Application (VBA) language and the Aspen HYSYS process simulator. In both units, chemical processes are modeled and simulated based on a real context. Aspen HYSYS is a process simulation software used by the vast majority of industries related to energy, oil and gas, refineries, and engineering companies to optimize processes and operations design (Aspentech, 2021).

Simulation-based learning is used to teach this software through face-to-face tutorials guided by the teacher. One of the learning objectives is to use Aspen HYSYS to apply the theoretical knowledge acquired in previous years on unit operations. Students reach an intermediate user level at the end of the course, simulating simplified chemical plants in a steady state. This knowledge becomes relevant in semester XI (sixth year) when students take the Project Engineering course. In this course, each student assumes a role as a project engineer, where they have to design a chemical plant or part of a chemical process, applying everything they have learned in the curricular program. Through progress reports, they carry out three stages where the software is used as a tool: i) in the preliminary study, an outline of the plant to define the process flow diagram or flowsheet; ii) in preliminary basic engineering, they fine-tune both the modeling and the simulation of the chemical plant, this includes the sizing of the equipment involved; iii) in the pre-feasibility study, they simulate different plant production scenarios to find the bottleneck points, and thus define the operating limits in each piece of equipment.

#### 1.4 PROBLEMS IN TEACHING PROCESS SIMULATION AND JUSTIFICATION FOR SELECTING DWSIM

The academic year 2019 ended in online mode. Both teachers and students could not connect to the Faculty of Engineering domain remotely, and so obtaining access to the DIQ server and using Aspen HYSYS. This eventuality caused that in the Computational Process Simulation course, it was not possible to teach this software to the students of semester X. The reasons that caused this problem are shown in Table I, where the main problem is the remote connection. In the beginning, a return was predicted (face-to-face teaching), so it was expected to resume this unit in semester XI. However, with the arrival of the pandemic in Chile, intermittent quarantines began in our city.

Fig. 1. Summary diagram of the process simulation teaching methodology at DIQ-UMAG modified from Navarro-Pérez and Llerena-Chávez (2016).



Due to the above, an Emergency Remote Teaching methodology had to be established, beginning the search for alternative software to Aspen HYSYS. The teachers in charge of the Computational Simulation of Processes and Project Engineering courses analyzed different software from the perspective of open-source license and complementary material availability to learn how to use it as a user. Through searching the Internet and consulting with colleagues in the discipline, we found two process simulators as potential alternatives: COCO (2021) and DWSIM (2021). Table II shows the analysis conducted, comparing, by different categories, what each software offers compared to Aspen HYSYS. Contrasting the alternatives from the point of view of language, license, installation, and customer service, both are similar and comparable. While the difference is in the simulation modes and the complementary material available. COCO only simulates in a steady state, while DWSIM also includes the dynamic state. The latter is crucial because, within the training of the chemical engineer, the instrumentation and control of processes can be simulated, something that Aspen HYSYS offers. COCO offers presentations, reference articles, sample files, and help regarding the learning resources available to use the software on its official pages. DWSIM provides all of the above, plus online courses and teaching videos. This category made the difference in our final decision to use DWSIM as an alternative software.

Table I. Class Type Comparison for Teaching Aspen HYSYS at the DIQ.

Category	Face-to-face class	Online class
<i>Software installation</i>	It is unnecessary for the students to install the software on their work equipment since the AspenONE software is installed on a DIQ server and can be used from any computer connected to the server.	Students must install the software on their work computer, which means that students cannot meet the minimum installation requirements.
<i>License access</i>	Access to the software license is obtained through the local network of the Faculty of Engineering of the UMAG. Specifically, the educational license is of the server type (License Server) stored on a DIQ server.	Access to the software license is not established in online mode.  The only option is to connect to the DIQ server by VPN (Virtual Private Network or Virtual Private Network).
<i>Connection type</i>	The software is configured to work through the university's domain (local network).	A remote connection is required to access the software, which is not feasible due to the instability of the Internet connection in the region.

Table II. Comparison of COCO, DWSIM and Aspen HYSYS commercial simulators.

Category	COCO (2021)	DWSIM (2021)	Aspen HYSYS (2021)
<i>Language</i>	English	English and Portuguese	English
<i>License</i>	Open-source	Open-source	Private (Paid)
<i>Operating systems</i>	Windows	Windows, macOS, Linux, and iOS	Windows

Category	COCO (2021)	DWSIM (2021)	Aspen HYSYS (2021)
<i>Customer support</i>	Does not provide direct support only discussion forums.	Does not provide direct support unless the user is a sponsor. It also has discussion forums.	It has online customer support, complementary material and discussion forums.
<i>Simulation modes</i>	Steady-state	Steady- and dynamic-state	Steady- and dynamic-state
<i>Calculation modes</i>	Most calculations are limited to only allowing data entry at the beginning of the flowsheet (entries in a system).	Most calculations are limited to only allowing data entry at the beginning of the flowsheet (entries in a system).	It offers various degrees of freedom (e.g., data can be defined, at the beginning of the flowsheet, at the outputs, making combinations, etc.).
<i>Available resources</i>	It features material generated by third parties. Most of the material is in English and is not intended for beginning learners.	It has material generated by third parties. The material is available in the languages of English, Portuguese and Spanish.	It has official material from the company and material generated by third parties certified by them.

## 2 DIQ-UMAG CASE STUDY

Our case study was carried out in the Project Engineering class in the final year, aiming to develop, apply, analyze, model, simulate and evaluate a preliminary basic engineering Project. Through project-based learning, each student plays a role as a project engineer in a team. The course has a total workload of ten hours per week, divided into two theoretical hours, two hours of exercises, and six hours of laboratory. The teaching coordinator carries out the syllabus between the theoretical hours and the exercises, while the laboratory hours are intended to simulate processes dictated by two support teachers.

### 2.1 CREATION OF A DWSIM MODULE

UMAG has an educational agreement with Google through the Google Workspace for Education Fundamentals. Therefore, it was decided to use Google Classroom (Google, 2021a) as a virtual classroom. Gómez-Goitia (2020) indicates that some of the advantages of using Google Classroom as a virtual platform: i) ease of classroom configuration: an invitation to students, notifications and questions in the Announcements section, uploading of documentation; ii) good classroom organization: friendly and instinctive graphical interface for the user, the tasks to be performed are seen in the Work section or calendar, Classroom link with Google tools such as Gmail, Drive, Calendar; iii) multidirectional

communication system: presents fluent communication between teachers and students; by sending notifications, teachers can initiate discussions or solve doubts online, and on the other hand, students can support each other online; and iv) data security: Classroom is free, data is kept safe on Google servers and services, student information is not used to create advertising profiles and data is protected according to the Google Workspace Agreement (Google, 2021b).

The module was created two weeks before formal classes, so teachers had to migrate tutorial material from Aspen HYSYS to DWSIM quickly. Within the literature review, there was material available on the official DWSIM (2021) webpage, in addition to the support of the creator and developer of the software Daniel Medeiros (Patreon, 2021), and with the notes in Spanish from the Center for Computer Applications and Modeling in Engineering, Argentina (CAIMI, 2021). Firstly, the planning and creation of module topics began; secondly, with the migration of the tutorials, the video tutorials were created consecutively. Table III shows the module's content; it is important to highlight the logical order of learning, starting from knowing the DWSIM environment, simulating the unit operations individually, and then simulating a chemical plant in a steady-state model. The order of the laboratory sessions was divided into two blocks, each one led by a teacher. Each block was divided into three stages: introduction to the topic and tutorials (synchronous); tutoring through the support of written material and video tutorials, with online assistance from the teacher (asynchronous); and closing of the block with a discussion of what has been learned (synchronous). Subsequently, students could independently review the tutorials through Google Classroom and YouTube.

## 2.2 CREATION OF VIDEO TUTORIALS

For the creation of video tutorials, a literature review was undertaken on the Internet about possible free tools for recording and editing videos, in addition to good practices in video tutorials. Regarding the recording tools, the OBS Studio software was chosen for recording (OBS Project, 2021), while, for editing, the OpenShot (2021) editor was used. Regarding the video tutorial production sequence, the guidelines described by Bengochea and Medina (2013), Arguedas-Matarrica and Herrera-Molina (2017), and Tuesta-Durango et al. (2017), to create a workflow according to the needs of the module were followed. The sequence performed for the creation of video tutorials is listed below:

1. Preparation of slides with the tutorial presentation included presenting the learning objectives, theoretical framework (if necessary), and a case study to simulate.

2. Script elaboration of the teacher's voice that follows the recording sequence.
3. The tone of voice rehearsal, to make sure it is in an active voice, with clear and simple language.
4. Recording process with OBS Studio.
5. Editing process in OpenShot; the video tutorials were divided into capsules of a maximum of 15 minutes.

It was decided to create a channel on the YouTube platform to guarantee better access to the audiovisual material generated. The material was uploaded and published, initially, privately (viewing only for students and teachers), developing a virtual interaction with the students thanks to rating systems such as the "Like" and "Comments" option (Google, 2021c). In addition, facilitating both access to the video tutorials and the rapid replication of tutorials since the students used an additional device to the computer such as a smartphone or tablet for this.

## 2.3 ASSESSMENT TOOLS

Table III shows the two summative evaluations carried out to evaluate what has been learned. After the fourth topic, the first assessment was carried out that consisted of an asynchronous online individual test. The students simulated an ideal Rankine cycle in DWSIM, applying what they had learned to date; an online Google Form was used for the students to enter the answers. Through the Google classroom, they would upload their simulation files. The second assessment consisted of simulating individual coursework; a maximum delivery period of 10 days was set. The students had to simulate an extractive distillation and sent their simulation files and spreadsheet with requested graphics by email. The arithmetic average of these assessments corresponded to 20% of the final grade for the Project Engineering course. As a formative assessment, a type forum with pragmatic dialogue (Collison et al., 2000) was organized to discuss the advantages and disadvantages of the DWSIM simulator, reflect on how to design, model, and simulate a chemical plant in a steady-state process simulator. The Meet platform was used; one of the teachers was the moderator, while the second teacher was the technical support. Each student was given five minutes to present the type of reactive distillation simulated in DWSIM and deliver a brief personal conclusion on the advantages and disadvantages of working with DWSIM. Subsequently, it was passed to the discussion forum, where each participant (including teachers) answered the following questions:

1. What are the advantages of a process simulator?
2. What are the problems encountered when performing a simulation in DWSIM, and how can they be solved?
3. What constructive criticism can you give us to improve the taught module?

The video call ended with a certificate delivery to prove that each student completed the DWSIM module at an intermediate user level.

Table III. Content of the DWSIM module.

Topic	Purpose	Material
<i>Resources</i>	How to install DWSIM. Get familiar with the Google Classroom environment.	Links from the DWSIM website, and YouTube videos.
<i>Introduction to DWSIM</i>	Know the environment and simulation flowchart. Understand the selection of thermodynamic models in simulation.	Presentations, written material, five tutorials with their respective videos.
<i>Fluid mechanics</i>	Simulate unit operations and fluid mechanics devices (pump, turbine, pipes, valves) available in DWSIM.	Presentations, written material, four tutorials with their respective videos.
<i>Logic operators and reactors</i>	Simulate the logic operators and reactors available in DWSIM.	Presentations, written material, five tutorials with their respective videos.
<b>Assessment 1</b>	<b>Simulation of an Ideal Rankine Cycle.</b>	<b>Written material and Google Form.</b>
<i>Heat transfer</i>	Simulate unit operations and heat-transfer devices (heat exchanger) available in DWSIM.	Presentations, written material, one tutorial with their respective video.
<i>Mass transfer</i>	Simulate unit operations and mass transfer devices (columns) available in DWSIM. Learn how to use the ChemSep to simulate columns.	Three tutorials with their respective videos.
<i>Steady-state chemical plant</i>	Apply what you have learned, simulating a simplified chemical plant in a steady state.	Presentations, written material, a tutorial with its respective video, and case study.
<b>Assessment 2</b>	<b>Extractive distillation simulation with ChemSep in DWSIM.</b>	<b>Written material.</b>

In the Project Engineering course, the project developed by the students was to carry out reverse engineering of producing ammonia with green hydrogen and determine its maximum purchase price destined for Japan. The process was simulated in DWSIM to estimate the material balance and investment. Finally, an anonymous survey was answered by the students after completing the Project Engineering course. The goal was to analyze whether they applied what was taught in the DWSIM module and know the level

of satisfaction with the teaching performance. This survey was conducted in Google Form divided into:

- i) Request for consent to use the respondent's information for teaching and scientific research purposes.
- ii) Demographic data.
- iii) Evaluation of the DWSIM module regarding the use of the DWSIM simulator.
- iv) Application of what has been learned in the Project Engineering course.

### 3 YOUTUBE CHANNEL DIQ\_DWSIM

As described in the previous section, a YouTube channel was created as DIQ\_DWSIM (2020). At first, the videos were uploaded in private mode so that only the students and teachers of the module had access to them. However, when the academic semester ended, it was decided to launch the channel publicly as an open online resource available to the YouTube community. The reasons behind this decision were to promote the image of DIQ on the Internet, generate an academic audiovisual resource in Spanish with free access, and offer a free online course that covers topics of process simulation in chemical engineering. Part of the reasons mentioned above are solutions to barriers that we detected, which prevent online learning of open source software such as DWSIM for any beginning user and finding teaching support material.

## 4 RESULTS

### 4.1 DWSIM MODULE RESULTS

Only three students took the Project Engineering course and, therefore, the DWSIM module. The age range is between 23 and 25 years old, divided into  $\frac{2}{3}$  female and  $\frac{1}{3}$  male from the gender perspective. From the internet connection point of view, two connections came from Punta Arenas city, while the other student connected from the capital Santiago de Chile. The assessment scale in the UMAG uses a scale from 1 to 7, with a 60% approval requirement. The first summative assessment had an arithmetic mean of 5.30 with a standard deviation of 1.14. The second summative assessment had an arithmetic mean of 4.90 with a standard deviation of 0.55. The final grade for the average module was 5.10, with a standard deviation of 0.38. The discussion forum had positive results where the contents learned in the module were reinforced, theoretical concepts were clarified, interpretation of the simulation concerning the real process, the role of the chemical engineer in the simulation of processes, among others. The only constructive criticism delivered throughout the course was that the asynchronous time was not enough

to carry out the tutorial completion, generating stress in the students. The reason for this situation is that the teachers were almost parallel creating the video tutorials, so the students did not have the option of entering the YouTube channel before class to review the tutoring, but only after the session of classes.

At the end of the academic year, an anonymous survey was sent to the students, divided into the DWSIM module and the application of what was learned. In the first section, the students responded with a Likert scale to 18 statements divided into three subsections. The responses to be selected were valued as: Totally disagree = 1, Disagree = 2, Neutral = 3, Agree = 4, and Totally agree = 5. Table IV shows the arithmetic mean and standard deviation by assertion, obtaining the following results:

Table IV. Average and standard deviation of the statements answered by the students with the Likert scale.

Statement	Average	Std. Dev.
<b>1. As for learning with DWSIM</b>		
You can establish the learning of mathematical concepts and methods associated with the simulation of processes through the use of DWSIM	4.67	0.58
The learning of the theoretical contents associated with the simulation of processes in plants or chemical processes can be improved with a commercial simulator such as DWSIM	5.00	0.00
With a commercial simulator such as DWIM, greater practicality and applicability of learning can be obtained, compared to the option of reading books and documents	4.67	0.58
Knowing and handling the DWSIM simulator to perform process simulation increased the degree of motivation as a student in this topic	5.00	0.00
An open-source simulator like DWSIM improved the degree of autonomy of my non-face learning	4.67	0.58
DWSIM has a user-friendly graphical interface, which makes the workflow instinctive	4.67	0.58
Training with DWSIM has improved my technical skills as a future chemical engineer	5.00	0.00
<b>Overall subsection 1</b>	<b>4.81</b>	<b>0.40</b>
<b>2. As regards to the content and online teaching</b>		
The Google Classroom (Virtual Classroom) was an ideal alternative, with easy access to the material and user-friendly	4.67	0.58
The written material (practical tutorials and support material) delivered was explicit, explanatory, and didactic for my learning in process simulation	5.00	0.00
The video tutorials helped me in my learning both synchronous (real-time online) and asynchronous (outside class hours)	4.67	0.58
The video tutorials were of high quality, providing both the theoretical knowledge and the practical sequence of performing simulations in DWSIM	4.67	0.58
Statement	Average	Std. Dev.
The fact that the video tutorials were available on YouTube made access faster and not difficult	5.00	0.00

Statement	Average	Std. Dev.
The online evaluations were relevant both for the content learned and adequate to be carried out online	4.67	0.58
Overall subsection 2	4.78	0.43
<b>3. As for the teacher performance</b>		
Teachers have great expertise in process simulation	5.00	0.00
The teachers' way of teaching was of high quality, with a dynamic that achieved both my attention and my motivation to learn	4.67	0.58
The teachers clarified all my doubts in time	4.67	0.58
Teachers turned in my evaluations on time	5.00	0.00
For the evaluation of my learning, I found that the realization of a discussion forum about what I learned was ideal	5.00	0.00
Overall subsection 3	4.87	0.35

- In their entirety, the students answered the statements between “Agree = 4” and “Strongly agree = 5”.
- For subsection 1, regarding learning with DWSIM, a total average of 4.81 and a standard deviation of 0.40 were obtained, indicating that the students acquired the technical ability to simulate processes with this simulator.
- For subsection 2, in terms of content and online teaching modality, a total average of 4.78 and a standard deviation of 0.43 were obtained. This means that the prepared material, the teaching modality, and the virtual classroom were ideal for the students.
- For subsection 3, regarding teaching performance, a total average of 4.87 and a standard deviation of 0.35 was obtained. This means that the teachers' expertise, the ERT methodology implement, and the discussion forum were pertinent so that the students acquired the technical skills of process simulation.

Two open questions were asked: What did you like the most about the module? And, What did you like the least about the module? Regarding the first question, the students thought they liked: the prepared material, the video tutorials, and the online teaching support to clarify doubts. In the second question, the students felt that they did not like that the classes were only once a week, having almost four chronological hours of an online session, having limited time to complete the video tutorials calmly. Finally, on a scale from 1 (Extremely dissatisfied) to 5 (Extremely satisfied), an average rating of 4.3 was obtained from the DWSI module.

In the second section, the students answered two closed questions (Yes / No) and two open ones. The closed questions were: DWSIM, Did it help you solve your case study,

either in part or in its entirety? And, When applying a commercial simulator like DWSIM in a basic engineering project, did it help you understand the importance of process simulation as a chemical engineer? In both, the students answered that Yes.

On the other hand, the first open question was: How did you use DWSIM? And the students answered:

Student 1: *“Flow diagram, process modeling, and determination of necessary raw material flows.”*

Student 2: *“To be able to simulate the Haber-Bosch process, and to know the amount of raw material that you would need under certain conditions.”*

Student 3: *“To simulate an ammonia cycle and obtain operating parameters.”*

These responses confirm that the students used DWSIM to solve the case study in Project Engineering. The second open question was: Tell us if you had any inconvenience when carrying out your simulation in DWSIM with an example, where the students answered:

Student 1: *“When running a complex simulation, many times the program would freeze or quit unexpectedly. In addition, when placing data or objects in the simulator, it must have a few seconds of “assimilation” with the change, which leads to a delay or the possibility of the program sticking.”*

Student 2: *“When I had some difficulty, the practical material was very helpful. Especially when certain equipment had to be used, and I did not remember which variables to add”.*

Student 3: *“The general downside of the software is that it sometimes gets stuck.”*

These responses were expected due to experience running simulations in DWSIM. The software performs calculations sequentially, from left to right and not vice versa, so any change in variables made in any part of the process will have to restart the rest of the calculations throughout the process. Also, when using equipment such as reactors or distillation columns, which have more complex calculation algorithms, DWSIM has a lower capacity than Aspen HYSYS in computational robustness. Finally, it is essential to mention that the user must understand the assumptions and restrictions of the simulator.

## 4.2 YOUTUBE CHANNEL RESULTS

The DIQ\_DWSIM channel was launched on August 10, 2020, with 19 tutorials broken down into 50 video tutorials; it currently has 152 subscribers and over 20,000 total views among the videos uploaded to the channel (reported on April 14, 2021). Google Analytics (Google, 2021d) was used. The following tables and figures show the data

obtained about the visualizations made in the DIQ\_DWSIM channel. The results obtained were expected in the categories analyzed in tables and figures because:

- The highest percentage of views obtained by age range corresponds, in general, to that of an average undergraduate student and young professionals to whom the channel is focused.
- The first three countries with the highest views are Spanish-speaking.
- The most sought-after tutorials are simulations of complex equipment such as distillation columns, but at the same time, tutorials on specific topics are the least sought after.
- The timeline in Fig. 4 agrees with what happened in the channel. First, in August 2020, the channel is opened to the public. Second, the sudden block changes in the number of views are due to other courses in other regions (Mexico and Colombia) addressing simulation processes.

Table V. Detail of the obtained data in Google Analytics.

Category	Statement
Audience age	The videos are mostly viewed by an audience aged 18 and 24 (77.1%), followed by an audience aged between 25 and 34 (12.4%). A better detail with the age ranges can be seen in Fig. 2.
Audience genre	From a gender point of view, the audience on the channel is 64.9% men and 35.1% women.
Geographical area	Of the views, the audience originates mainly from Mexico (72.9%), followed by Colombia (5.4%) and Spain (2.2%). A more detailed breakdown of the geographic area of the visualizations can be seen in Fig. 3.
Video (average percentage viewed)	Tutorial 17 (Rigorous distillation column) is the tutorial with the highest average percentage seen (37.02%, 43.9%, and 47.57% in its three sections, respectively). In comparison, tutorial 19 (Liquefied natural gas plant) is the lowest Average percentage seen (15.53%, 20.37%, and 21.91% in its three sections, respectively).
Visualizations overview	Fig. 4 shows the increase in views from August 2020, in addition to block increases in specific periods.

Fig. 2. Age range of viewers on the DIQ\_DWSIM channel.

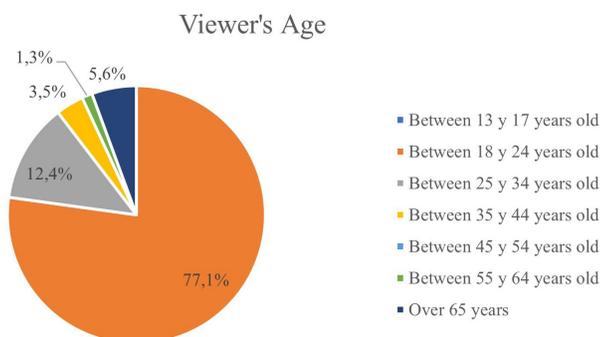


Fig. 3. Geographical map of the location of the DIQ\_DWSIM channel visualizations.

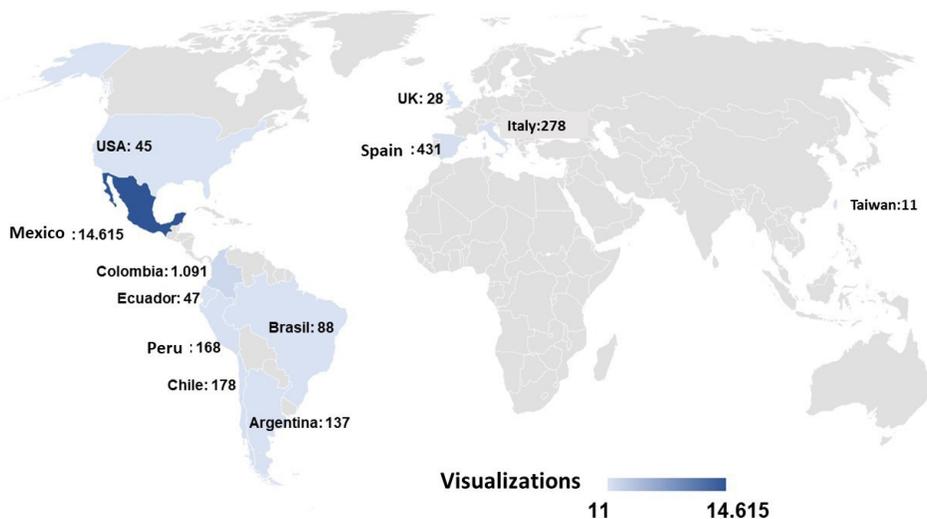
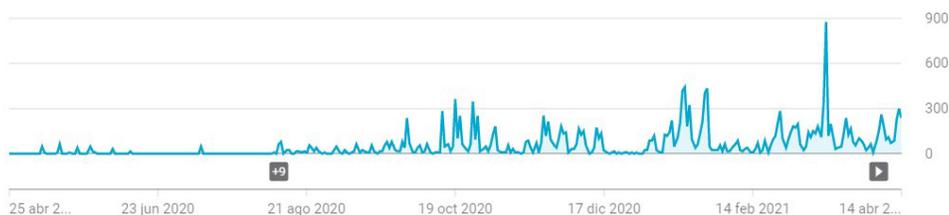


Fig. 4. DIQ\_DWSIM channel visualization overview.



As a result of the impact of this channel, collaborations were carried out in two Latin American universities: Universidad de Santiago de Chile and Universidad Veracruzana, Mexico. To analyze the effect on the audience of our channel, an anonymous survey divided into:

- i) Request for consent to use the respondent's information for teaching and scientific research purposes.
- ii) Demographic data.
- iii) Evaluation of the YouTube channel.

This survey was sent to the students of these universities, and we also invited our audience by uploading a video titled "DIQ\_DWSIM we want to know your opinion" (DIQ\_DWSIM, 2021). The total number of people surveyed was 94, where 23% have an age range of 17 to 20 years, 64% have 21 to 23 years, and 13% are older than 23 years. From a gender point of view, 55% identify as female and 45% as male. More than 80% of those surveyed are pursuing undergraduate or graduate degrees related to chemical

engineering or process engineering. 93% of the respondents' study in Mexico, 2% study in Chile, and 4% of the respondents are not students.

The first question was to indicate the reasons why they visited our channel, which 63% of the respondents stated that it was used as the primary material to learn DWSIM, 55% of the respondents indicated that it was used as complementary material to understand DWSIM, and 41% of respondents told it was to self-learn about DWSIM. The second question involved categorizing five statements regarding the content of the videos. Respondents responded with a Likert scale with the categories of: Totally disagree = 1, Disagree = 2, Neutral = 3, Agree = 4, and Totally agree = 5. Table V shows the arithmetic mean and standard deviation by assertion, obtaining the following results:

In their entirety, the students answered the five statements between the ranges of "Neutral = 3", "Agree = 4," and "Strongly agree = 5".

- For the first statement, a total average of 4.27 and a standard deviation of 0.80 were obtained, indicating that respondents agree that both the form and structure of the video tutorials were adequate to focus.
- For the second statement, a total average of 4.35 and a standard deviation of 0.83 were obtained. This indicates that the video tutorials served as a resource to understand the simulation of processes.
- For the third statement, a total average of 4.04 and a standard deviation of 0.94 were obtained. This indicates that the respondents agree that both the voice and the tone of the teacher's voice-over were adequate.
- For the fourth statement, a total average of 4.17 and a standard deviation of 0.89 were obtained. This indicates that the respondents agree that the length of the videos was optimal.
- For the fifth statement, a total average of 4.34 and a standard deviation of 0.78 were obtained. This tells us that respondents agree that the simulated processes in DWSIM represent real industrial processes.

The next question was whether they replicated the tutorials watched on the channel, to which 68% of those surveyed indicated that they did. Of this group, 31% indicated that they never had simulation problems, 27% indicated that they rarely had problems, 36% indicated that they sometimes had simulation problems, 5% almost always had problems, and 1% always had problems. Among the issues reported they were related to convergence. Only problems were reported in replicating tutorial 14, where two respondents indicated a discrepancy with the data provided in the video with respect to the results they simulated in DWSIM. Of the 19 tutorials available on our channel, 7% of the respondents answered that they did all the tutorials, 6% of the respondents carried out

between 13 to 18 tutorials, 27% of the respondents carried out between 7 to 12 tutorials. A 60% carried out between 1 to 6 tutorials.

From the subscription point of view, 80% of respondents are subscribed to our channel, and 44% of respondents have shared our videos on their social networks or among their contacts. All respondents indicated that they would like to see more video tutorials. The most suitable topics were more complex industrial processes, operations with chemical agents in reactors, and distillation columns; They also indicated the replication of case studies from academic books and the use of complementary tools. It is also important to mention that some respondents stated that they would like to see video tutorials of other commercial software such as Aspen HYSYS or AVEVA (used at the Universidad Veracruzana). Finally, all those surveyed consider that the audiovisual material seen on the channel has helped them understand how a process simulator works. In general, respondents have rated their degree of audience satisfaction on a scale from 1 (extremely dissatisfied) to 5 (extremely satisfied), with an average of 4.3.

Table VI. Average and standard deviation of the statements answered by respondents about their opinion on the DIQ\_DWSIM YouTube channel with a Likert scale.

Statement	Average	Std. Dev.
<b>1. Regarding the content of the videos on our YouTube channel</b>		
The form and structure of the video tutorials are relevant to get my attention and focus on their content	4.27	0.80
The video tutorials helped me understand the importance of process simulation in chemical engineering	4.35	0.83
The teacher's voice and tone was correct to keep me attentive to the video	4.04	0.94
The length of the videos was optimal	4.17	0.89
The tutorials shown in the videos provide examples close to the reality of an industrial process	4.34	0.78
<b>Overall</b>	<b>4.33</b>	<b>0.85</b>

## 5 DISCUSSION OF THE RESULTS

### 5.1 EMERGENCY REMOTE TEACHING IN PROCESS SIMULATION

According to what was indicated by Hodges et al. (2020) and Portillo et al. (2020), to evaluate the ERT methodology, one must focus on the context, the input elements, the learning process, and the final product. The teachers' opinion is that thanks to the free applications available on Google and the selection of DWSIM as an alternative process simulator, both the context and the input elements were implemented correctly. Both the summative and informative assessments of the module indicate that the ERT methodology implemented by the teachers was the pertinent one to achieve that our students acquired the technical skills of process simulation before graduating.

Regarding the summative assessments, both the resulting averages per assessment and the total average of the module indicate the students' excellent performance. It is important to tell that the requirement in DIQ courses is 60%, that is to say, the passing grade is 4.0, and to be exempted from a course, the total grade point average must be equal to or greater than 5.0. Some challenges presented in these evaluations were that the time established to complete the tests was not sufficient; for the first test, a time of 2 chronological hours was given while the students finished in 3 hours, and, for the second test, 5 days was initially given while the students finished in 10 days. The reason for delivering on a more extended deadline was the high academic load in the other courses. Concerning the discussion forum, we confirmed that the students learned what was seen in the DWSIM module. Video tutorials are highlighted to complement the written material, favoring independent learning, reinforcing theoretical concepts, and covering possible learning gaps. In addition, as Jiménez-Castillo and Marín-Carrillo (2012) describe from the teaching view, video tutorials avoid repetitiveness allowing the teacher to focus on the learning process of their students. Also, if the teacher carries out the video tutorials, both the reception of information and the learning by their students will increase.

The anonymous survey provides very positive results regarding the methodology implemented. All students agreed that the virtual classroom, the online support from teachers, and the video tutorials were ideal for learning to simulate with DWSIM. The results of the Likert scale assertions shown in Table VI confirm that learning with DWSIM, the online modality implemented, and the teaching performance was excellent, since there was a total general average of 4.33 and a standard deviation of 0.85. In addition, it is confirmed that they used DWSIM as a process simulator in their case study in Project Engineering, managing to simulate an ammonia cycle and performing different analyzes necessary to design a chemical plant. The learning based on simulators implemented in the module agrees with that indicated by Borreguero et al. (2019) that commercial simulators make it possible for students to simulate real processes with complex and fast automatic calculations. Based on assumptions and restrictions of the software, this teaching type provides technical simulation skills that are key to a recently graduated chemical engineer entering the labor market.

## 5.2 IMPACT OF THE DIQ\_DWSIM CHANNEL

The number of subscribers and views achieved to date is surprising, where almost 90% of the audience are university students and young professionals, and more than 80% come from Spanish-speaking countries. Therefore, our channel has been beneficial

for young beginners in DWSIM and process simulation. In addition, the first five minutes of each video are the most watched by viewers, meaning that they review what the video is about, what will be simulated, and based on this, they decide whether they continue to watch it or not. Here there is a difference with respect to a student spectator of a formal course and a self-taught spectator.

The anonymous survey that evaluated the opinion of the audience of our channel delivers positive and revealing results. First of all, it is formidable that the total of respondents is 94, compared to the DWSIM module of 3 students managing to increase our audience 30 times by simply launching our channel publicly. Several teachers have found our channel and used it either as primary or complementary material in their courses, confirming that we are right in our purpose of providing a Spanish-speaking free online learning resource. In general, regarding the content of the videos, the respondents agree that they learned to use DWSIM through practical examples of industrial processes, the length of the videos, tone of the teacher's voice-over, the form, and structure of the videos. Videos are suitable for their attention and understanding. These results agree with case studies reported by Arguedas and Herrera (2017), López (2018), and Álvarez (2019).

Most of the respondents simulated between 1 to 12 tutorials, representing 63% of the tutorials available on the channel. Only issues of replicating the simulation were reported in tutorial 19 due to video editing problems, which DIQ teachers knew in advance, as it had been detected in the DWSIM module. This video will be reviewed and modified in the future. Respondents rate the channel with an average of 4.3, on a scale of 1 (extremely dissatisfied) to 5 (extremely satisfied), as did the students of the DWSIM module. So, we can point out that our channel satisfies what the audience expects in our video tutorials.

## 6 CONCLUSION

The Emergency Remote Teaching methodology implemented together with the simulation-based learning and the experience of teachers managed to deliver technical skills to students in process simulation. According to the assessment instruments carried out in the Project Engineering course, the selection of the alternative DWSIM software was the correct one to replace Aspen HYSYS. The creation of video tutorials and the DIQ\_DWSIM channel were key to the success of our objective and to deliver support material that third parties. The anonymous survey proved that two Latin American universities formally used it in their courses and YouTube users as well.

Undoubtedly, the COVID-19 pandemic has forced and awakened teachers to seek innovative ways to generate engaging content for student-centered learning. The

creation of these video tutorials has not only managed to provide an immediate solution to our teaching emergency, but they have also served many teachers, students, and young engineers to learn about DWSIM and how to simulate industrial processes.

As ways for the future, the DIQ teachers will propose to generate virtual laboratories to simulate other types of equipment, analyze their performance and the calculation equations behind them. These simulations can be used early course; thus, visual support would be delivered, complementing with the creation of video tutorials for the teacher, allowing more open resources in Spanish.

## 7 ACKNOWLEDGMENT

We appreciate the collaboration of the academics, Dr. Francisco Cubillos Montecinos from the Universidad de Santiago de Chile, and Eng. Rafael Melo Gonzalez from the Universidad Veracruzana of Mexico, in sending the anonymous survey to their students. This work was supported and funded by the Chemical Engineering Department of the Universidad de Magallanes, Chilean Patagonia.

## REFERENCES

- Álvarez, J. F. (Eds.). (2019). Nuevas formas de aprender con YouTube del alumnado universitario de educación. Edicions de la Universitat de Leida. DOI: [doi.org/10.21001/edutec.2019](https://doi.org/10.21001/edutec.2019)
- Arguedas-Matarrica, C. & Herrera-Molina, E. (2017). Un canal en YouTube como herramienta de apoyo a un curso de física en educación a distancia. *Revista Ensayos Pedagógicos*, XIII(1), 107-130. DOI: [doi.org/10.15359/rep.13-1.5](https://doi.org/10.15359/rep.13-1.5)
- AspenTech. (2021). Aspen HYSYS. Aspen Technology website, 2021. Available from: <https://bit.ly/2Q4wzkD>
- Bengochea, L- & Medina, J. A. (2013). El papel de los videotutoriales accesibles en el aprendizaje del futuro. Proceedings of the V Congreso Internacional ATICA, Huancayo, Peru.
- Borreguero, A. M., Valverde, J. L., García-Vargas, J. L. & Sánchez-Silva, M. (2019). Simulator-based learning in the teaching of chemical engineering. *Computer Applications in Engineering Education*, 27(5), 1267-1276. DOI: [doi.org/10.1002/cae.22150](https://doi.org/10.1002/cae.22150)
- Cabero-Almenara, J. & Llorente-Cejudo, C. (2020). Covid-19: transformación radical de la digitalización en las instituciones universitarias. *Campus Virtuales*, 9 (2), 25-34.
- CAIMI. (2021). Modelado en ingeniería. Centro de Aplicaciones Informáticas y Modelado en Ingeniería – CAIMI. Available from: <https://bit.ly/3dr85La>
- COCO. (2021). What is COCO?. COCO website. Available from <https://bit.ly/3srykVR>
- Collison et al. (2000). Aprendizaje en ambientes virtuales: Estrategias efectivas para moderadores de discusiones. Atwood Publishing. Available from: <https://bit.ly/3ghalqD>

De Jong, T. & Van Joolingen, W. (1988). Scientific discovery learning with computer simulations of conceptual domains. *Review of Educational Research*, 68(2), 179-201. DOI: doi.org/10.3102%2F00346543068002179

DIQ\_DWSIM. (2020). DIQ\_DWSIM YouTube channel. Available from: <https://bit.ly/3alj1rT>

DIQ\_DWSIM. (2021). DIQ\_DWSIM queremos saber tu opinión. [Video file] Available from: <https://bit.ly/3aiD620>

DWSIM. (2021). Chemical Process Simulation for everyone. DWSIM official website. Available from: <https://bit.ly/2Qvh84G>

El Magallánico. (2020). Se puso término al paro estudiantil de actividades en la Universidad de Magallanes. Prensa El Magallánico. Available from: <https://bit.ly/3gjiP2>

Fernandes, F. (2002). Use of process simulators for the unit operations education of undergraduate chemical engineers. *Computer Applications in Engineering Education*, 10(3), 155-160. DOI: doi.org/10.1002/cae.10023

Ghasem, G. (2016). Enhanced teaching and student learning through a simulator-based course in chemical unit operations design. *European Journal of Engineering Education*, 41 (4), 455-467. DOI: doi.org/10.1080/03043797.2015.1095158

Gómez-Goitia, J. M. (2020). Buena práctica docente para el diseño de aula virtual en Google Classroom. *Revista Andina de Educación*, 3 (1), 64-66. DOI: doi.org/10.32719/26312816.2020.3.1.7

Google. (2021a). Obtén más tiempo para enseñar e inspirar a los alumnos con Classroom. Google for education. Available from: <https://bit.ly/3n1eBLU>

Google. (2021b). Centro de privacidad y seguridad. Google for education. Available from: <https://bit.ly/2QACnBY>

Google. (2021c). Cambiar la configuración de privacidad de un vídeo. Ayuda de YouTube. Available from: <https://bit.ly/2QDTgM4>

Google. (2021d). Le damos la bienvenida a Google Analytics. Google Analytics, 2021. Available from: <https://bit.ly/32sSLaq>

Haydary, J. (Ed.). (2019). Chemical Process Design and Simulation: Aspen Plus and Aspen HYSYS Applications. John Wiley and Sons Ltd.

Hodges, C. et al. (2020). The difference between emergency remote teaching and online learning. *EDUCAUSE Review*. Available from: <https://bit.ly/2Qx7nD2>

INE. (2017). Servicio de mapas del Censo 2017 de Chile. Available from: <https://bit.ly/2RzIZ47>

Jiménez-Castillo, D. & Marín-Carrillo, G.M. (2012). Asimilación de contenidos y aprendizaje mediante el uso de videotutoriales. *Enseñanza and Teaching*, 30(2), 63-79. Available from: <https://bit.ly/3uWnjxF>

López, J. L.. (2018). YouTube como herramienta para la construcción de la sociedad del conocimiento. *Revista de Ciencias Humanísticas y Sociales*, 3(1), 1-16. Available from: <https://bit.ly/32qlXz6>

MINSAL. (2020a). Ministerio de Salud confirma primer caso de coronavirus en Chile. Ministerio de Salud. Available from: <https://bit.ly/3v4XRGn>

- MINSAL. (2020b). Ministerio de Salud amplía duración de cuarentena en 6 comunas de RM y Rapa Nui. Ministerio de Salud. Available from: <https://bit.ly/3ahVh7F>
- Montes-Rodríguez, A. L., Villalobos-Benavides, V. & Ruiz-Chaves, W. (2020). Estrategias didácticas empleadas desde la presencialidad remota en la División de Educación para el Trabajo de la Universidad Nacional en tiempos de pandemia. *Revista Innovaciones Educativas*, 22(Special), 243-262. DOI: [doi.org/10.22458/ie.v22iEspecial.3251](https://doi.org/10.22458/ie.v22iEspecial.3251)
- Navarro-Pérez, D. & Llerena-Chávez, H. (2016). Análisis de estrategias para incorporar Aspen HYSYS en el plan de estudios de la carrera de pregrado de ingeniería civil química. Congreso Chileno de educación en ingeniería, Pucón, Chile.
- OBS Project. (2021). OBS Studio. OBS Studio software website. Available from: <https://bit.ly/3amc3mm>
- OpenShot. (2021). Acerca de OpenShot. OpenShot software website, 2021. Available from: <https://bit.ly/2RKR9vv>
- Patreon. (2021). Daniel Medeiros is creating open source chemical engineering software. Patreon website. Available from: <https://bit.ly/3x4wHRv>
- Portillo, S. et al. (2020). Enseñanza remota de emergencia ante la pandemia Covid-19 en Educación Media Superior y Educación Superior. *Propósitos y Representaciones*, 8(SPE3), e589. DOI: [dx.doi.org/10.20511/pyr2020.v8nSPE3.589](https://dx.doi.org/10.20511/pyr2020.v8nSPE3.589)
- Prensa Presidencia. (2020a). Presidente Piñera decreta Estado de Excepción Constitucional de Catástrofe en todo el país por 90 días para enfrentar coronavirus: “Cuidémonos entre todos”. Prensa Presidencia de Chile. Available from: <https://bit.ly/3e9w8gU>
- Prensa Presidencia. (2020b). Presidente Piñera amplía Estado de Excepción Constitucional de Catástrofe en todo el país por 90 días. Prensa Presidencia de Chile, 2020. Available from: <https://bit.ly/3tuZgpe>
- Prensa Presidencia. (2020c). Presidente Piñera anuncia extensión de Estado de Excepción por 90 días. Prensa Presidencia de Chile, 2020 Available from: <https://bit.ly/3snOpvW>
- Reyes Rodríguez, A. M. (2019). AutoCAD 2019. Anaya Multimedia.
- Román, Á. (2020). Integración territorial como marginación: obstáculos para las zonas aisladas en Aysén y Magallanes, Chile. *Revista LIDER*, 22 (37), 77-99. DOI: [doi.org/10.32735/S0719-5265202037177](https://doi.org/10.32735/S0719-5265202037177)
- Tuesta-Durango et al. (2017). Los videotutoriales como medio para generar nuevos entornos de enseñanza-aprendizaje en las asignaturas de Estructuras de la Edificación. IV Congreso Internacional sobre Aprendizaje, Innovación y Competitividad, Zaragoza, Spain. DOI: [dx.doi.org/10.26754/CINAIC.2017.000001\\_145](https://dx.doi.org/10.26754/CINAIC.2017.000001_145)
- UMAG. (2020a). Resolución N°003/2019-VRAC Oficializa proceso cierre segundo semestre año académico 2019 e inicio año académico 2020. Vicerrectoría Académica UMAG.
- UMAG. (2020b). UMAG prepara clases online y autoriza actividades administrativas a distancia. Vinculación con el Medio. Available from: <https://bit.ly/32piMYb>
- UMAG. (2021) Sistema de gestión institucional UMAG. Dirección de Análisis Institucional. Available from: <https://bit.ly/2RzIZ47>

## SOBRE O ORGANIZADOR

**Xosé Somoza Medina** (1969, Ourense, España) Licenciado con Grado y premio extraordinario en Geografía e Historia por la Universidad de Santiago de Compostela (1994). Doctor en Geografía e Historia por la misma universidad (2001) y premio extraordinario de doctorado por su Tesis “Desarrollo urbano en Ourense 1895-2000”. Profesor Titular en la Universidad de León, donde imparte clases desde 1997. En la Universidad de León fue Director del Departamento de Geografía entre 2004 y 2008 y Director Académico de la Escuela de Turismo entre 2005 y 2008. Entre 2008 y 2009 ejerció como Director del Centro de Innovación y Servicios de la Xunta de Galicia en Ferrol. Entre 2007 y 2009 fue vocal del comité “Monitoring cities of tomorrow” de la Unión Geográfica Internacional. En 2012 fue Director General de Rehabilitación Urbana del Ayuntamiento de Ourense y ha sido vocal del Consejo Rector del Instituto Ourenseño de Desarrollo Local entre 2011 y 2015. Ha participado en diversos proyectos y contratos de investigación, en algunos de ellos como investigador principal, con temática relacionada con la planificación urbana, la ordenación del territorio, las nuevas tecnologías de la información geográfica, el turismo o las cuestiones demográficas. Autor de más de 100 publicaciones relacionadas con sus líneas de investigación preferentes: urbanismo, turismo, gobernanza, desarrollo, demografía, globalización y ordenación del territorio. Sus contribuciones científicas más importantes se refieren a la geografía urbana de las ciudades medias, la crisis del medio rural y sus posibilidades de desarrollo, la evolución del turismo cultural como generador de transformaciones territoriales y más recientemente las posibilidades de reindustrialización de Europa ante una nueva etapa posglobalización. Ha participado como docente en masters y cursos de especialización universitaria en Brasil, Bolivia, Colombia, Paraguay y Venezuela y como docente invitado en la convocatoria Erasmus en universidades de Bulgaria (Sofía), Rumanía (Bucarest) y Portugal (Porto, Guimarães, Coimbra, Aveiro y Lisboa). Ha sido evaluador de proyectos de investigación en la Agencia Estatal de Investigación de España y en la Organización de Estados Iberoamericanos (OEI). Como experto europeo en Geografía ha participado en reuniones de la Comisión Europea en Italia y Bélgica. Impulsor y primer coordinador del proyecto europeo URBACT, “come Ourense”, dentro del Programa de la Unión Europea “Sostenibilidad alimentaria en comunidades urbanas” (2012-2014). Dentro de la experiencia en organización de actividades de I+D+i se pueden destacar la organización de diferentes reuniones científicas desarrolladas dentro de la Asociación de Geógrafos Españoles (en 2002, 2004, 2012 y 2018).

## ÍNDICE REMISSIVO

### A

Abastecimiento energético 158

Agricultura 1, 2, 3, 4, 6, 9, 16, 52, 226, 276

Agua 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 35, 66, 72, 83, 89, 90, 91, 92, 94, 95, 97, 99, 100, 101, 152, 153, 154, 164, 165, 166, 167, 168, 170, 175, 179, 180, 208, 209, 281, 282, 283

ANN 19, 20, 21, 22, 23, 25, 26, 29, 30, 31, 33, 34, 35, 37

Arqueología 149, 151, 156, 157

Arsénico 207, 208, 209, 210, 213, 214, 215

### B

Bioenergía 158, 164

Biogás 84, 158, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173

Biomasa 50, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 63, 64, 83, 84, 158, 266, 269, 271, 277, 278

### C

Cauce 1, 5, 6, 7, 11, 15, 16, 17

Caudal mínimo 1, 10, 28

Cementos alternativos 174

Ciudad igualitaria 125, 126, 127, 144

Coahuila 1, 2, 3, 5, 7, 14, 18, 38

Comarca Lagunera 1, 2, 3, 4, 6, 15, 16, 17, 18

Conservación 2, 10, 12, 13, 14, 15, 17, 64, 74, 75, 77, 78, 90, 91, 92, 232, 234, 235

COVID-19 86, 102, 103, 113, 114, 288, 289, 290, 291, 308, 309, 311

Cuenca 1, 4, 5, 6, 7, 8, 11, 12, 13, 15, 16, 17, 19, 27, 154

Cultura ambiental 65, 74, 75, 78

### D

Daucus carota 207, 208, 209, 213, 215

Dendroenergía 265

Densidad anhidra 279, 283, 284, 285

Densidad básica 279, 283, 284, 285

Densidad de la pared celular 279, 281, 282, 283, 284, 285, 286

Derechos 1, 2, 7, 9, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 90, 128, 130

Desarrollo cognitivo 228, 243  
Desarrollo de competencias 89, 95  
Desarrollo local 80  
Difusión 77, 86, 207, 209, 213, 214  
DIN EN ISO 13849 245, 262  
Diseño de productos 65  
Diterpenoids 216, 218, 221, 222, 223, 224, 225, 226, 227  
Durango 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 296, 311  
DWSIM 288, 289, 290, 292, 294, 295, 296, 297, 298, 299, 300, 301, 302, 303, 304, 305, 306, 307, 308, 309, 310

## E

Economía 4, 64, 66, 69, 73, 80, 82, 91, 151, 158, 170, 174, 176, 177, 178, 179, 181, 276  
Economía circular 66, 69, 73, 158, 174, 176, 177, 178, 179, 181  
Ecosistema 1, 2, 4, 9, 10, 12, 16, 80, 81  
Educación 15, 18, 65, 67, 80, 83, 85, 87, 88, 90, 93, 97, 101, 102, 103, 104, 107, 108, 113, 114, 124, 125, 135, 137, 145, 289, 309, 310, 311  
E-learning 102, 103, 107, 113, 114  
Electrochemical etching 185, 186, 196, 197  
Emprendedorismo 80, 81, 82, 83, 85, 86, 88  
Endophytic bacteria 39  
Energía 21, 72, 80, 81, 84, 85, 88, 158, 159, 160, 162, 165, 166, 168, 169, 172, 173, 174, 175, 179, 180, 228, 232, 233, 234, 235, 238, 240, 266, 278  
Energías renovables 67, 80, 81, 83, 85, 88, 159, 160  
Espacio 50, 53, 86, 103, 104, 108, 137, 140, 141, 142, 143, 147, 149, 150, 151, 152, 154, 155, 156, 237  
España 18, 87, 88, 112, 125, 127, 128, 131, 135, 136, 139, 140, 144, 146, 147, 156, 164, 173, 243, 279

## F

Failure Mode and Effects Analysis 245, 262  
Feminismo en la ciudad 125  
FMEA 245, 246, 249, 250, 253, 254, 255, 257, 259, 260, 261, 262, 263  
Fuerza de trabajo 115, 120  
Functional foods 199

## G

Gas sensors 185, 186, 189

Geopolímeros 174, 176, 177, 178, 179, 180, 181

Gestión 1, 2, 5, 7, 8, 9, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 20, 66, 74, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 99, 100, 101, 108, 114, 125, 136, 145, 159, 178, 311

Gestión educativa 89

Grado de terneza 207, 209, 211, 212

## H

Híbrido 19, 21, 26, 30, 33, 34, 264, 267, 270, 271, 278

Historia 18, 125, 126, 147, 149, 151, 155, 156, 157

Hydrocarbons 39, 43, 45, 48

## I

Instrucción 228, 229, 230, 231, 233, 237, 243

## L

Laguna 1, 3, 4, 7, 18, 48, 73

Lepidoptera 216, 217, 225, 226, 227

Lethal and sublethal effects 216, 225, 227

Líneas de producción 115, 118, 121, 122, 123

## M

Macroporous silicon 185, 186, 187, 188, 189, 190, 192, 196, 197

Materiales inteligentes 174, 181

Mathematical modeling 199, 201, 202

Medio ambiente 1, 2, 4, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 64, 73, 78, 79, 81, 85, 88, 90, 132, 133, 134, 159, 163, 174, 181

Métodos de trabajo 115, 118, 121, 122, 123

Mezquite 65, 66, 67, 68, 69, 73

Mid Infrared 185, 190, 197

Mineralization 39, 40, 43, 47, 208

Modelo matemático 22, 228, 231, 233, 234, 236, 237, 238, 239, 240, 241

Modelos de simulación 115, 116, 124

Municipio 4, 6, 66, 74, 75, 76, 77, 135, 138, 158, 160, 161

## O

Olives 198, 199, 200, 201, 202, 203, 205, 206

## P

Perspectiva de género 125, 126, 127, 130, 131, 132, 134, 136, 138, 143, 144, 145, 146, 147

Plants 38, 39, 41, 47, 216, 217, 227, 265, 277, 292, 300

Poda 65, 66, 67, 68, 264, 265, 267, 268, 269, 270, 271, 272, 273, 274, 275

Porosidad 180, 279, 281, 283, 284, 285, 286

Potassium chloride 199, 200, 201, 205

Presa 1, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 18

Process simulation 288, 290, 291, 292, 293, 299, 300, 301, 302, 306, 308

Profesionalización en el sector hídrico 89

Programa 10, 19, 54, 63, 66, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 89, 91, 92, 95, 97, 98, 99, 103, 116, 137, 140, 161, 268, 276, 283

Pronóstico a corto plazo 19

Propiedad física 279

Purificación 164, 169

## R

Recepa 264, 265, 269, 275

Remediación ambiental 174

Remote emergency teaching 288

Rendimiento escolar 102, 104, 105, 106, 107, 108, 111, 112, 113, 114

Residuos sólidos 65, 158, 159, 160, 163

Residuos sólidos urbanos 158, 159, 160, 163

Riego 1, 3, 4, 5, 7, 13

Río 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 27, 28, 30, 34, 150, 152, 218, 226

Río Amazonas 19, 21, 27, 28, 30, 34

## S

Safety Function-FMEA 245

Secuestro de carbono 51, 52, 59

Sendero 149, 150, 151, 153, 154, 155

Servicio ambiental 51, 52, 60, 61

Siloxanos 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173

Silvicultura 265  
Sistema agroforestal 51, 61, 62, 64  
Soil 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 51  
Sticherus quadripartitus 216, 217, 218

## T

Tecnologías 4, 82, 107, 140, 158, 159, 164, 166, 167, 173, 180, 312  
Teorías prescriptivas 228  
Tiempo de cocción 207, 209, 211, 212, 214  
Tierra 1, 51, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 64, 66, 154, 156  
Transformación 65, 137, 138, 149, 152, 158, 281, 309  
Transformada wavelet 19, 21, 24, 30

## U

Urbanismo no sexista 125

## V

Vertederos 158, 160, 164, 165, 167, 171, 173

## Y

YouTube channel 288, 290, 299, 300, 302, 304, 306, 310