

Estudos em Ciências Exatas e da Terra

Desafios, Avanços e Possibilidades

Alireza Mohebi Ashtiani
(organizador)

VOL II

 EDITORA
ARTEMIS
2024

Estudos em Ciências Exatas e da Terra

Desafios, Avanços e Possibilidades

Alireza Mohebi Ashtiani
(organizador)

VOL II



EDITORA
ARTEMIS
2024



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.

Editora Chefe	Prof. ^a Dr. ^a Antonella Carvalho de Oliveira
Editora Executiva	M. ^a Viviane Carvalho Mocellin
Direção de Arte	M. ^a Bruna Bejarano
Diagramação	Elisangela Abreu
Organizador	Prof. Dr. Alireza Mohebi Ashtiani
Imagem da Capa	Abstract Style Landscapes /123RF
Bibliotecário	Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422

Conselho Editorial

Prof.^a Dr.^a Ada Esther Portero Ricol, *Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”*, Cuba
Prof. Dr. Adalberto de Paula Paranhos, *Universidade Federal de Uberlândia*, Brasil
Prof. Dr. Agustín Olmos Cruz, *Universidad Autónoma del Estado de México*, México
Prof.^a Dr.^a Amanda Ramalho de Freitas Brito, *Universidade Federal da Paraíba*, Brasil
Prof.^a Dr.^a Ana Clara Monteverde, *Universidad de Buenos Aires*, Argentina
Prof.^a Dr.^a Ana Júlia Viamonte, *Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP)*, Portugal
Prof. Dr. Ángel Mujica Sánchez, *Universidad Nacional del Altiplano*, Peru
Prof.^a Dr.^a Angela Ester Mallmann Centenaro, *Universidade do Estado de Mato Grosso*, Brasil
Prof.^a Dr.^a Begoña Blandón González, *Universidad de Sevilla*, Espanha
Prof.^a Dr.^a Carmen Pimentel, *Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro*, Brasil
Prof.^a Dr.^a Catarina Castro, *Universidade Nova de Lisboa*, Portugal
Prof.^a Dr.^a Círcia Cervera Delgado, *Universidad de Guanajuato*, México
Prof.^a Dr.^a Cláudia Neves, *Universidade Aberta de Portugal*
Prof.^a Dr.^a Cláudia Padovesi Fonseca, *Universidade de Brasília-DF*, Brasil
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos, *Universidade Federal da Grande Dourados*, Brasil
Prof. Dr. Cristo Ernesto Yáñez León – *New Jersey Institute of Technology*, Newark, NJ, Estados Unidos
Prof. Dr. David García-Martul, *Universidad Rey Juan Carlos de Madrid*, Espanha
Prof.^a Dr.^a Deuzimar Costa Serra, *Universidade Estadual do Maranhão*, Brasil
Prof.^a Dr.^a Dina Maria Martins Ferreira, *Universidade Estadual do Ceará*, Brasil
Prof.^a Dr.^a Edith Luévano-Hipólito, *Universidad Autónoma de Nuevo León*, México
Prof.^a Dr.^a 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 (USP)*, Brasil
Prof. Dr. Eloi Martins Senhoras, *Universidade Federal de Roraima*, Brasil
Prof.^a Dr.^a Elvira Laura Hernández Carballido, *Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo*, México



Prof.^a Dr.^a Emilas Darlene Carmen Lebus, *Universidad Nacional del Nordeste/ Universidad Tecnológica Nacional, Argentina*
Prof.^a Dr.^a 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. Fernando Hitt, *Université du Québec à Montréal, Canadá*
Prof. Dr. Gabriel Díaz Cobos, *Universitat de Barcelona, Espanha*
Prof.^a Dr.^a Gabriela Gonçalves, Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), Portugal
Prof.^a Dr.^a Galina Gumovskaya – Higher School of Economics, Moscow, Russia
Prof. Dr. Geoffroy Roger Pointer Malpass, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil
Prof.^a Dr.^a Gladys Esther Leoz, *Universidad Nacional de San Luis, Argentina*
Prof.^a Dr.^a 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. Guillermo Julián González-Pérez, *Universidad de Guadalajara, México*
Prof. Dr. Håkan Karlsson, *University of Gothenburg, Suécia*
Prof.^a Dr.^a Iara Lúcia Tescarollo Dias, Universidade São Francisco, Brasil
Prof.^a Dr.^a Isabel del Rosario Chiyon Carrasco, *Universidad de Piura, Peru*
Prof.^a Dr.^a 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.^a Dr.^a Ivânia Maria Carneiro Vieira, Universidade Federal do Amazonas, Brasil
Prof. Me. Javier Antonio Albornoz, *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. Juan Porras Pulido, *Universidad Nacional Autónoma de México, 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.^a Dr.^a Livia do Carmo, Universidade Federal de Goiás, Brasil
Prof.^a Dr.^a 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.^a Dr.^a Macarena Esteban Ibáñez, *Universidad Pablo de Olavide, Espanha*
Prof. Dr. Manuel Ramiro Rodriguez, *Universidad Santiago de Compostela, Espanha*
Prof. Dr. Manuel Simões, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal
Prof.^a Dr.^a 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.^a Dr.^a Mar Garrido Román, *Universidad de Granada, Espanha*
Prof.^a Dr.^a Margarida Márcia Fernandes Lima, Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil
Prof.^a Dr.^a María Alejandra Arecco, *Universidad de Buenos Aires, Argentina*
Prof.^a Dr.^a Maria Aparecida José de Oliveira, Universidade Federal da Bahia, Brasil
Prof.^a Dr.^a Maria Carmen Pastor, *Universitat Jaume I, Espanha*

Prof.ª Dr.ª Maria da Luz Vale Dias – Universidade de Coimbra, Portugal
Prof.ª Dr.ª Maria do Céu Caetano, Universidade Nova de Lisboa, Portugal
Prof.ª Dr.ª Maria do Socorro Saraiva Pinheiro, Universidade Federal do Maranhão, Brasil
Prof.ª Dr.ª MªGraça Pereira, Universidade do Minho, Portugal
Prof.ª Dr.ª Maria Gracinda Carvalho Teixeira, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Brasil
Prof.ª Dr.ª María Guadalupe Vega-López, *Universidad de Guadalajara, México*
Prof.ª Dr.ª 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. Dr. Melchor Gómez Pérez, *Universidad del Pais Vasco, Espanha*
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. Sérgio 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 (IPEN)- USP, Brasil
Prof.ª Dr.ª Stanislava Kashtanova, *Saint Petersburg State University, Russia*
Prof.ª Dr.ª Susana Álvarez Otero – *Universidad de Oviedo, Espanha*
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)

E82 Estudos em Ciências Exatas e da Terra: Desafios, Avanços e Possibilidades II / Organizador Alireza Mohebi Ashtiani. – Curitiba, PR: Artemis, 2024.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

Edição bilíngue

ISBN 978-65-81701-39-0

DOI 10.37572/EdArt_271124390

1. Ciências exatas e da terra – Pesquisa – Brasil. I. Ashtiani, Alireza Mohebi.

CDD 509

Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422

INTRODUÇÃO

A coletânea *Estudos em Ciências Exatas e da Terra: Desafios, Avanços e Possibilidades II* reúne contribuições significativas nas áreas de geociências, engenharia e física, com um foco particular na análise e solução de problemas complexos em diferentes contextos e regiões do mundo. Os artigos apresentados neste volume abordam desde questões geológicas e ambientais até modelos matemáticos avançados aplicados a problemas práticos, evidenciando a diversidade e a riqueza dos desafios contemporâneos enfrentados por pesquisadores nas Ciências Exatas e da Terra.

O primeiro artigo, *Feições Erosivas em Vargem Alta (Espírito Santo, Brasil)*, trata das dinâmicas de erosão no município de Vargem Alta, com um olhar atento aos processos naturais e suas consequências para o meio ambiente local. Em seguida, *Análise de Estabilidade de Talude no Município de Vargem Alta (ES)* oferece uma análise detalhada sobre a estabilidade de taludes e suas implicações para a segurança das áreas urbanas e rurais afetadas.

No artigo *Contribuição para o Zoneamento de Risco de Inundações Urbanas no Município de Lichinga, Província de Niassa, Moçambique*, o foco se desloca para a aplicação de metodologias para o zoneamento de risco de inundações, um tema de grande importância para o planejamento urbano e a segurança das populações em regiões vulneráveis.

No trabalho *Paleocanais na Plataforma Continental Interna do Rio Grande: Evidências de Variações Eustáticas Durante o Quaternário*, os autores investigam as evidências geológicas de mudanças eustáticas, proporcionando uma compreensão mais profunda dos eventos climáticos e ambientais que marcaram a história do planeta.

No campo da geografia e da agricultura, *Consolidação de Terras Agrícolas (Estudo de Caso Russo)* apresenta um estudo de caso sobre a reorganização da agricultura em uma região da Rússia, discutindo a viabilidade de práticas de consolidação de terras para otimizar o uso da terra e aumentar a produção agrícola.

Seguindo para a física aplicada, o artigo *1D Space-Time Solution of the Species Diffusion Equation with Double Entry Boundary in Spherical Foods* explora soluções matemáticas para a equação de difusão de espécies, com aplicação no setor alimentício, focando na modelagem de processos dentro de esferas alimentícias.

Em seguida, *Modelo Matemático de Difracción en Región de Fresnel Convergente y Divergente de una Lente Esférica* apresenta um modelo matemático inovador para a difração da luz em lentes esféricas, contribuindo para o campo da óptica e suas aplicações.

Por fim, *Caracterización de los Efectos de una Fulguración Solar* discute os impactos de eventos solares extremos, com foco nas implicações para a física espacial e para a proteção de tecnologias modernas sensíveis, como satélites e sistemas de comunicação.

Como é possível observar, este volume é uma contribuição valiosa para o avanço das Ciências Exatas e da Terra, apresentando uma ampla gama de pesquisas que têm o potencial de influenciar práticas em diversas áreas, desde a mitigação de riscos ambientais até o desenvolvimento de novas tecnologias e abordagens inovadoras em várias disciplinas. A variedade de temas e abordagens evidenciam a complexidade dos desafios que os pesquisadores enfrentam atualmente e reforçam a importância da colaboração interdisciplinar para o progresso científico.

Desejo a todos uma proveitosa leitura!

Alireza Mohebi Ashtiani

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1..... 1

FEIÇÕES EROSIVAS EM VARGEM ALTA (ESPÍRITO SANTO, BRASIL)

Éder Carlos Moreira

Leonardo Coelho Fabrino Filho

 https://doi.org/10.37572/EdArt_2711243901

CAPÍTULO 2..... 15

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDE NO MUNICÍPIO DE VARGEM ALTA (ES)

Éder Carlos Moreira

Eric José Cerqueira Gonçalves

Thiago Curty Vimercati

 https://doi.org/10.37572/EdArt_2711243902

CAPÍTULO 3..... 27

CONTRIBUIÇÃO PARA O ZONEAMENTO DE RISCO DE INUNDAÇÕES URBANAS NO MUNICÍPIO DE LICHINGA, PROVÍNCIA DE NIASSA, MOÇAMBIQUE

Americo José Fombe

Gustavo Sobrinho Dgedge

 https://doi.org/10.37572/EdArt_2711243903

CAPÍTULO 4..... 47

PALEOCANAIS NA PLATAFORMA CONTINENTAL INTERNA DO RIO GRANDE: EVIDÊNCIAS DE VARIAÇÕES EUSTÁTICAS DURANTE O QUATERNÁRIO

Laurício Corrêa Terra

 https://doi.org/10.37572/EdArt_2711243904

CAPÍTULO 5..... 56

AGRICULTURAL LAND CONSOLIDATION (RUSSIAN CASE STUDY)

Alexander Sagaydak

Anna Sagaydak

 https://doi.org/10.37572/EdArt_2711243905

CAPÍTULO 6..... 64

1D SPACE-TIME SOLUTION OF THE SPECIES DIFFUSION EQUATION WITH DOUBLE ENTRY BOUNDARY IN SPHERICAL FOODS

Juan Ignacio González Pacheco

Mariela Beatriz Maldonado

Ariel Fernando Márquez Agüero

Paula Anabella Giorlando Videla

Leonel Nicolás Lisanti

Carla Rocío Zaragoza

Oscar Daniel Galvez

 https://doi.org/10.37572/EdArt_2711243906

CAPÍTULO 7 85

MODELO MATEMÁTICO DE DIFRACCIÓN EN REGIÓN DE FRESNEL CONVERGENTE Y DIVERGENTE DE UNALENTE ESFÉRICA

Esteban Andrés Zárate

Quintiliano Angulo Córdova

Marian Cristina Ricárdez Torres

Omar Morales Alejos

Israel Benjamín Sánchez Jiménez

José Adán Hernández Nolasco

 https://doi.org/10.37572/EdArt_2711243907

CAPÍTULO 8..... 100

CARACTERIZACIÓN DE LOS EFECTOS DE UNA FULGURACIÓN SOLAR

Guillermo Daniel Rodriguez

Ricardo Ezequiel Garcia

Leonardo José Navarría

Nicolas Quaglino

 https://doi.org/10.37572/EdArt_2711243908

SOBRE O ORGANIZADOR.....112

ÍNDICE REMISSIVO 113

CAPÍTULO 1

FEIÇÕES EROSIVAS EM VARGEM ALTA (ESPÍRITO SANTO, BRASIL)

Data de submissão: 25/10/2024

Data de aceite: 14/11/2024

Éder Carlos Moreira

Professor Adjunto do curso de
Geologia na Universidade Federal do
Espírito Santo (UFES)
Alegre – Espírito Santo

<http://lattes.cnpq.br/9650042242680161>

Leonardo Coelho Fabrino Filho

Graduado em Geologia pela Universidade
Federal do Espírito Santo (UFES)
Alegre – Espírito Santo

<http://lattes.cnpq.br/9677406483488981>

RESUMO: A erosão do solo pode ser intensificada por atividades humanas como desmatamento e agricultura intensiva. O município de Vargem Alta, situado ao sul do estado do Espírito Santo, enfrenta dificuldades devido às suas características geográficas e às práticas econômicas locais. Os processos erosivos podem resultar na perda de solo, assoreamento de rios, diminuição de nutrientes e compactação do solo, afetando a agricultura

e gerando prejuízos a toda sociedade. Além disso, formam feições erosivas como sulcos, ravinas e voçorocas. O estudo realizado envolveu a classificação supervisionada do uso e ocupação da terra entre os anos de 2017 e 2023. Os resultados apresentaram redução da cobertura vegetal ao longo dos anos e aumento nas áreas com solo exposto. Foram analisadas feições erosivas em quatro locais para verificar a influência de fatores geológicos, pedológicos e de precipitação na região. Recomendações para a prevenção e controle da erosão incluem a conservação de espécies vegetais que ajudam a estabilizar o solo.

PALAVRAS-CHAVE: Feições erosivas. Movimentos de massa. Uso e ocupação do solo.

EROSIVE FEATURES IN VARGEM ALTA (ESPÍRITO SANTO, BRAZIL)

ABSTRACT: Soil erosion can be intensified by human activities such as deforestation and intensive agriculture. The municipality of Vargem Alta, located in the south of the state of Espírito Santo, faces difficulties due to its geographical characteristics and local economic practices. Erosion processes can result in soil loss, siltation of rivers, nutrient depletion and soil compaction, affecting agriculture and causing damage to society as a whole. They also form erosive features such as furrows, gullies and ravines. The study involved supervised classification of land use

and occupation between 2017 and 2023. The results showed a reduction in vegetation cover over the years and an increase in areas with exposed soil. Erosion features were analyzed in four locations to verify the influence of geological, pedological and precipitation factors in the region. Recommendations for preventing and controlling erosion include the conservation of plant species that help stabilize the soil.

KEYWORDS: Erosive features. Mass movements. Land use and occupation.

1 INTRODUÇÃO

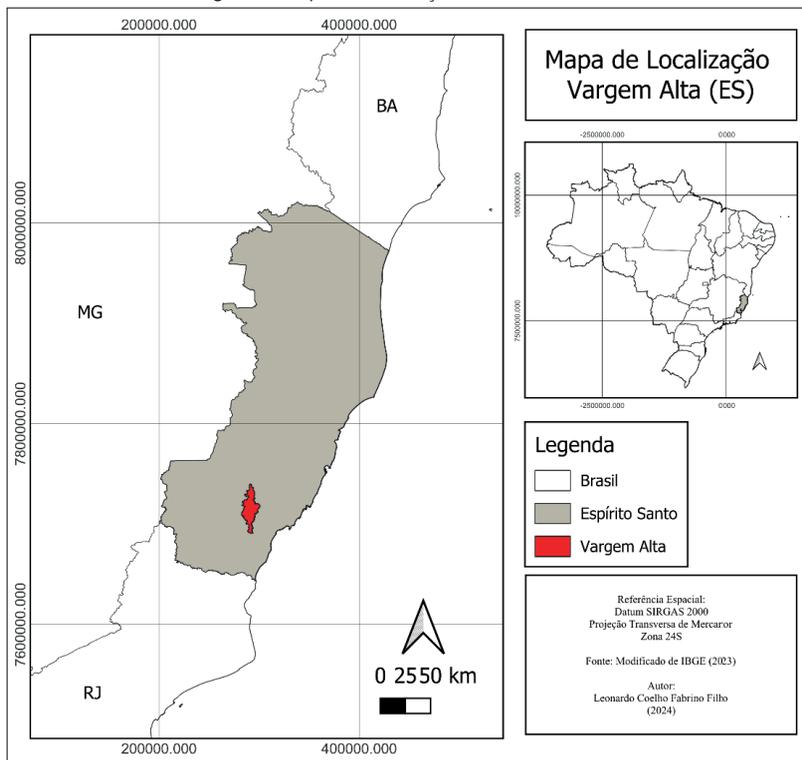
O estado do Espírito Santo é caracterizado por uma formação geológica única, de relevo diversificado e sua proximidade com o Oceano Atlântico que resulta em uma grande variedade de solos. Esses solos capixabas se distinguem não apenas pelas suas características físicas e morfológicas, mas também por suas composições mineralógicas e químicas, influenciadas tanto pelas rochas de origem quanto pelos fatores ambientais presentes durante sua formação (Lima, 2022).

A erosão, um processo natural influenciado por condições climáticas, geomorfológicas, pedológicas e litológicas, é igualmente afetada por atividades humanas. O uso e a ocupação inadequados do solo podem intensificar e acelerar os processos erosivos, desestabilizando o sistema morfodinâmico de uma área (Daniel, Vieira & Martins, 2021).

Dessa forma, quando a vegetação é removida de uma área, o solo fica mais vulnerável a erosão, causada pelo impacto das gotas de água, especialmente durante as chuvas. Isso resulta em movimento de massa no solo e, conseqüentemente, em processos erosivos como sulcos, ravinas e voçorocas (Cardoso & Pires, 2010).

O presente estudo visou analisar o comportamento de feições erosivas em áreas do município de Vargem Alta, situado ao sul do estado do Espírito Santo (Figura 1). Durante o trabalho de campo, foram identificados quatro pontos com expressivas manifestações erosivas.

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo.

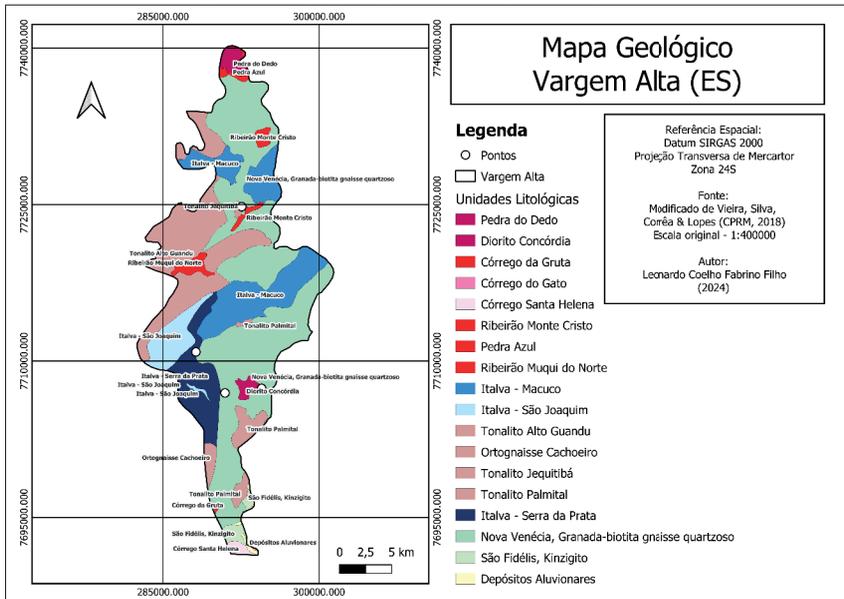


Fonte: Autores (2024).

2 EMBASAMENTO TEÓRICO

Nos pontos de estudo, a litologia predominante é composta por rochas do Grupo Itálva, especificamente da Unidade Macuco. Essa unidade é caracterizada por uma sequência vulcano-sedimentar que inclui gnaisses de anfíblio-biotita e gnaisses leucocráticos de biotita, com intercalações de anfíbolitos e rochas calcissilicáticas. Além disso, na porção oeste do município, encontram-se rochas também pertencentes ao Grupo Itálva, porém da Unidade Serra da Prata. Esta unidade é composta por hornblenda-biotita gnaiss, com intercalações de gnaisses cinzentos e leucognaisses de granulação fina (Figura 2) (Moraes et al., 2024, apud Vieira, 2018).

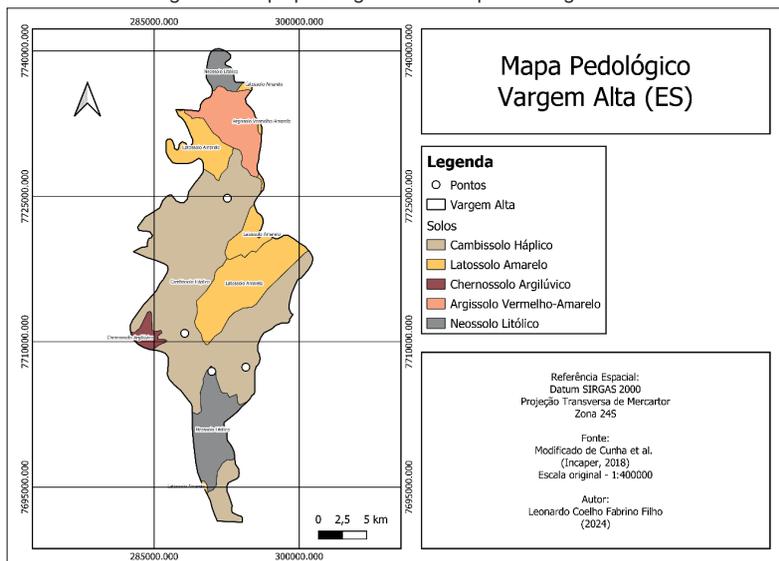
Figura 2 – Mapa geológico do município de Vargem Alta.



Fonte: Modificado de Vieira et al (2018).

Os pontos abordados neste trabalho estão situados em ambientes de cambissolos háplicos e neossolos litólicos (Figura 3), tendo concentrações significativas na área total do município.

Figura 3 - Mapa pedológico do município de Vargem Alta.



Fonte: Modificado de Cunha et al (2018).

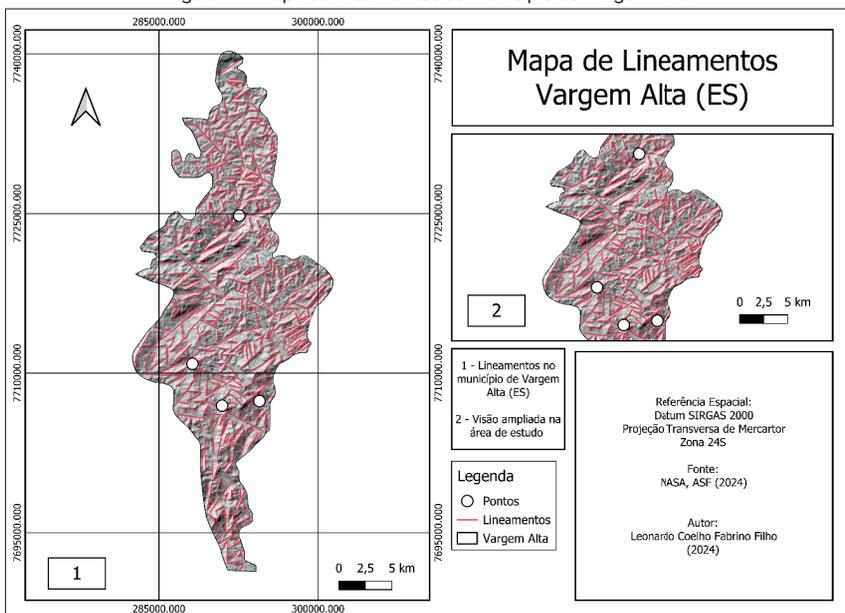
De acordo com a Embrapa (2013), os cambissolos são solos com um horizonte B incipiente, subjacente a qualquer tipo de horizonte superficial. Na área de estudo, a subordem e o grupo dos cambissolos são os háplicos tb distróficos, apresentando material argiloso de baixa atividade. Esses solos são geralmente encontrados em terrenos fortemente ondulados ou montanhosos e não possuem um horizonte A húmico. Ademais, sua fertilidade pode variar consideravelmente, e suas principais limitações incluem declives acentuados, baixa profundidade e a presença de pedras no solo (Santos, Zaroni & Almeida, 2021).

Os neossolos são solos pouco desenvolvidos, caracterizados por uma espessura de material mineral e orgânico inferior a 20 cm e sem um horizonte B diagnóstico (Embrapa, 2013). Os neossolos litólicos têm uma profundidade reduzida, com horizontes sobre a rocha geralmente não excedendo 50 cm. Estes solos são frequentemente encontrados em terrenos íngremes, e suas limitações incluem a profundidade limitada, a presença de rochas e as inclinações acentuadas, fatores que dificultam o crescimento das raízes, o uso de maquinaria agrícola e aumentam o risco de erosão (Santos, Zaroni & Almeida, 2021).

A área de estudo está inserida na unidade Patamares Escalonados do Sul Capixaba, que segundo Radambrasil (1983), é caracterizada por um conjunto de relevos que se assemelham a degraus, oferecendo acesso a diferentes níveis topográficos e estes apresentando uma morfologia geralmente uniforme. Dessa forma, são comuns evidências de voçorocamento, escorregamentos e quedas de blocos (Burgos, Fornaciari & Wanderley, 2006).

O patamar oriental situa-se entre o topo do planalto a oeste e as Colinas e Maciços Costeiros a leste, exibindo as características de um grande bloco inclinado para o leste. Este patamar é notável pela presença de sulcos estruturais evidentes, que seguem predominantemente a direção norte-sul, além de falhas menores que se entrecruzam (Figura 4).

Figura 4 – Mapa de lineamentos do município de Vargem Alta.



Fonte: Autores (2024).

Na região de estudo, os lineamentos seguem uma direção preferencial NE-SW. Todavia, é possível identificar um significativo lineamento de comportamento N50°W na porção centro-norte da área de estudo, este denominado Lineamento Píuma, descrito como uma zona de fratura intensa (Lourenço, 2015).

A precipitação média anual no município de Vargem Alta é de 1.594,4 mm, distribuída sazonalmente em dois períodos distintos. O período chuvoso ocorre de outubro a abril, totalizando 1.269,8 mm, o que representa 79,6% da precipitação anual. Já o período menos chuvoso vai de maio a setembro, com um total de 324,5 mm, correspondendo a 20,4% do total anual (Incapet, 2023).

Considerando dados do Incaper (2023), a vegetação predominante em Vargem Alta é originária da Mata Atlântica, cobrindo cerca de 20% do município. Essa vegetação é mais concentrada nas áreas de maior altitude e é composta principalmente por mata secundária e em regeneração, com poucas áreas de mata primitiva.

A economia municipal gira em torno da agricultura e pecuária. Na porção norte do município, sendo caracterizada por terras frias, acidentadas e chuvosas, predominam a fruticultura em geral, o cultivo de café arábica e a olericultura. Na região central, observa-se uma diversificação das atividades, com o cultivo de café arábica e café conilon, além de banana, abacate e turismo rural. A pecuária na área inclui a suinocultura, criação de

aves e, em menor escala, a bovinocultura de corte. No sul do município, destacam-se o cultivo de café conilon, banana, piscicultura e pecuária (Incaper, 2023).

3 METODOLOGIA

3.1 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

Durante a revisão bibliográfica, foram coletados dados sobre aspectos fisiográficos do município, incluindo geologia, pedologia, geomorfologia (formas do relevo), precipitação e cobertura vegetal.

3.2 CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA

O método de classificação supervisionada foi aplicado usando o complemento Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) no *software* QGIS, versão 3.36. O SCP utiliza polígonos previamente realizados pelo usuário durante uma demarcação de treinamento. A partir disso, o algoritmo do complemento identifica outras regiões semelhantes, classificando as demais áreas da imagem.

Para este trabalho, foram consideradas cinco classes de polígonos, a saber: Corpo hídrico; Área urbana; Agricultura (café e pastagem); Solo exposto; Vegetação nativa. As imagens do satélite Sentinel-2, com resolução de 10 metros, serviram como base para a classificação das classes mencionadas. Foram utilizadas imagens dos anos de 2017, 2019, 2021 e 2023.

3.3 ATIVIDADE DE CAMPO

Durante o trabalho de campo em Vargem Alta, foram realizadas fotografias aéreas utilizando *drone* modelo DJI Mini 2, e a descrição fisiográfica dos pontos observados. Nesse processo, foram identificadas diversas feições erosivas com potencial de risco. Dessa forma, foram selecionados quatro pontos com distintas expressões erosivas. Essas distinções podem estar associadas ao formato da erosão, ao tipo de movimentação de massa ou aos aspectos fisiográficos presentes.

3.4 CONFECÇÃO DE MAPAS

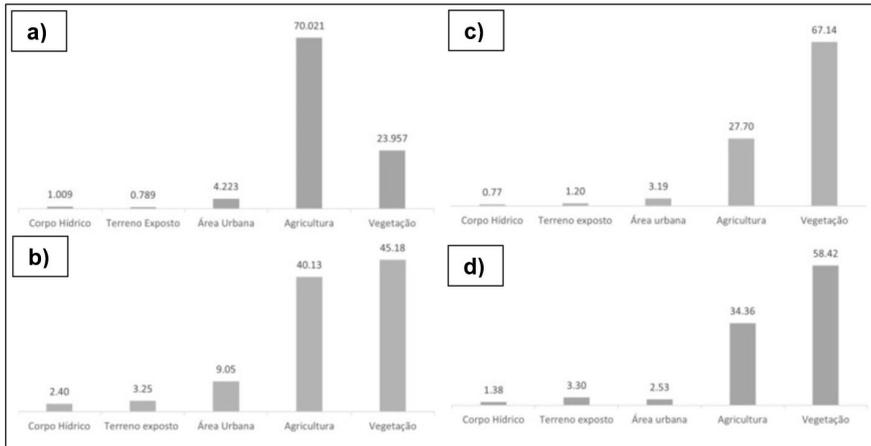
Após a realização da atividade de campo, as descrições obtidas foram interpretadas em conjunto com arquivos matriciais e vetoriais que abordam as características fisiográficas do município de Vargem Alta, por meio do *software* QGIS 3.36. A partir disso, foram confeccionados os mapas: Mapa de Localização (IBGE, 2023); Mapa Geológico (CPRM, 2018) e Mapa Pedológico (Cunha et al, 2018).

4 RESULTADOS

4.1 CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA

A classificação supervisionada permitiu analisar características fisiográficas do município. É importante ressaltar que os dados gerados são de interpretação dos autores deste trabalho (Figura 5).

Figura 5 – Gráficos com resultados da classificação supervisionada realizada para os anos considerados, sendo: a) 2017; b) 2019; c) 2021; d) 2023.



Fonte: Autores (2024).

O ano de 2017 (Figura 5-a) revela que a vegetação natural cobre significativa parte do território de Vargem Alta, com destaque para a Mata Atlântica. A classe de agricultura, considerando café e pastagem, representa aproximadamente 70% do município, sendo a principal atividade agrícola a cafeicultura (Incaper, 2023). A área urbana ocupa cerca 4,2% do território municipal. A classe dos corpos hídricos representa cerca de 1% da área total do município. As áreas com solo exposto ocupam 1,1% do território, sendo este um indicador de degradação ambiental.

Em 2019 (Figura 5-b), o gráfico mostra as áreas cobertas pela vegetação nativa (45,18%) e agricultura (40,13%) sendo predominantes, representando 85,31% da área total do município. Há um aumento nas áreas relativas a solo exposto (3,25%). As classes de corpos hídricos e área urbana tiveram um aumento devido a influência de nuvens na imagem de satélite que influenciaram nos resultados destas. Isso se justifica devido que as cores refletidas destas classes nas bandas espectrais utilizadas são semelhantes à coloração das nuvens, prejudicando na identificação (Quartaroli & Batistella, 2006).

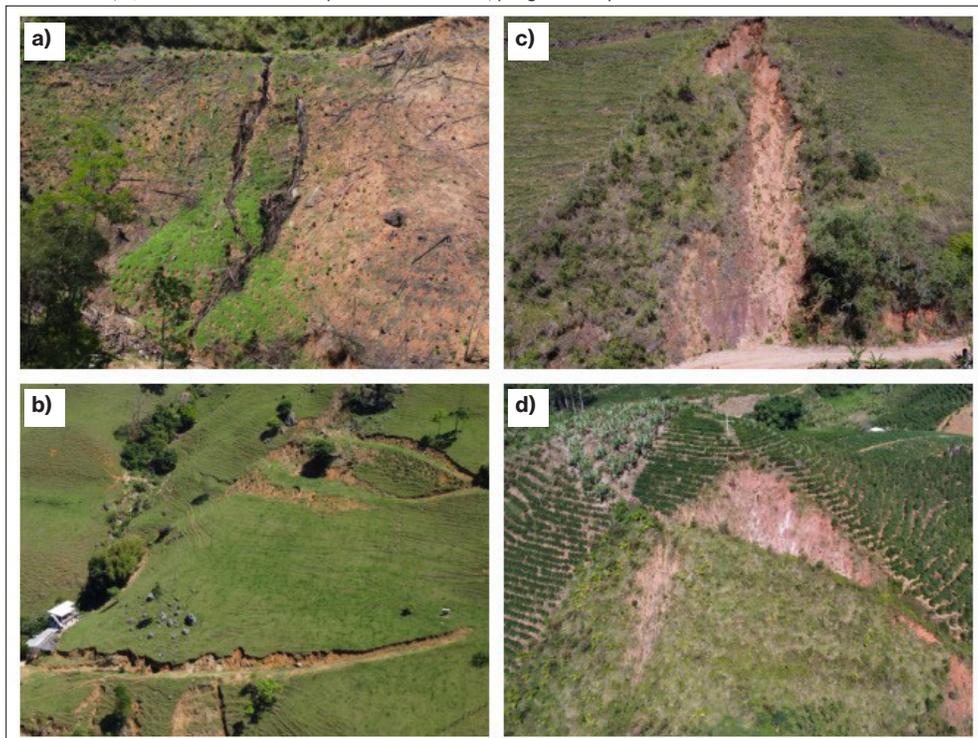
No ano de 2021 (Figura 5-c) se mantém a tendência dos anos anteriores, com a vegetação (67,14%) e agricultura (27,70%), representando aproximadamente 94,8% do município. As áreas de solo exposto diminuíram. A menor porcentagem da área urbana comparada com o ano de 2017 (onde não houve interferência de nuvens) pode ser inferida pelo crescimento da vegetação mais densa, que na imagem de satélite sobrepõe as estradas.

Por fim, o ano de 2023 (Figura 5-d) mantém o padrão dos anos anteriores em relação à vegetação (58,42%) e agricultura (34,36%), representando aproximadamente 92,8% do município. As áreas de solo exposto aumentaram consideravelmente (3,30%).

4.2 DESCRIÇÃO DOS PONTOS

Durante a etapa de campo, foram observados quatro pontos que apresentavam significativas feições erosivas (Figura 6). A partir disso, foram realizadas descrições fisiográficas.

Figura 6 – Pontos com feições erosivas, sendo: a) Processo de ravinamento progredindo para voçoroca; b) Deslizamento em cunha com sulcos progredindo para ravinas; c) Conjunto de feições erosivas em processo de ravinamento; d) Erosão laminar acompanhada de sulcos, progredindo para ravinas.



Fonte: Autores (2024).

No primeiro ponto (Figura 6-a) foi observado um processo de ravinamento progredindo para a formação de voçorocas. Verifica-se que nesta área havia uma plantação de eucaliptos, que logo após o plantio, sofreu queimada. O talude tem uma elevada inclinação. Estas condições associadas à concentração de água oriunda da porção superior do talude tornam propício o desencadeamento de sulcos que podem progredir para voçorocas.

No segundo ponto (Figura 6-b) é possível considerar um conjunto de feições erosivas marcadas por sulcos progredindo para ravinas. Verificou-se ao centro da imagem uma drenagem natural. Tanto a direita quanto a esquerda desta podem ser observados degraus de abatimento promovidos pela pisada de animais. Estes degraus de abatimento podem tornar-se rastejos que evoluem para ravinas e sulcos.

Posteriormente, verifica-se um deslizamento em cunha evidenciado por dois planos preferenciais (Figura 6-c). Possivelmente, trata-se da presença de estruturas reliquias da rocha no maciço terroso, como cita Moreira & Pires (2022). Observou-se que houve um deslizamento de grande monta e posteriormente instalou-se um processo erosivo nessa feição, onde há grande quantidade de material mobilizado e surgimento de sulcos, progredindo para uma ravina.

O quarto ponto (Figura 6-d) indica um deslizamento planar de grande monta. Além disso, é notado um processo erosivo instalado no talude onde houve o deslizamento. As expressões erosivas incluem sulcos, progredindo para ravinas. Ademais, cabe destacar que o talude em questão possui uma inclinação elevada e a vegetação aparenta ter sido reconstituída naturalmente devido a lavoura de café em torno da massa movimentada.

5 DISCUSSÃO

A análise integrada dos aspectos fisiográficos e de uso e ocupação do solo no município de Vargem Alta revela uma interação de fatores que contribuem para o surgimento e a evolução das feições erosivas.

Os cambissolos, sendo predominante na área de estudo, possuem baixa profundidade. Neossolos também são pouco desenvolvidos e estão frequentemente associados a terrenos íngremes. Com isso, o comportamento raso destes solos facilita movimentos de massa principalmente quando o ambiente se encontra desprotegido de vegetação (Santos, Zaroni & Almeida, 2021).

O estudo indicou lineamentos com predominância de orientação na direção NE-SW, revelando um relevo bastante acidentado e fraturado. Esse comportamento geomorfológico fragiliza o solo, tornando-o mais suscetível à erosão e facilitando o

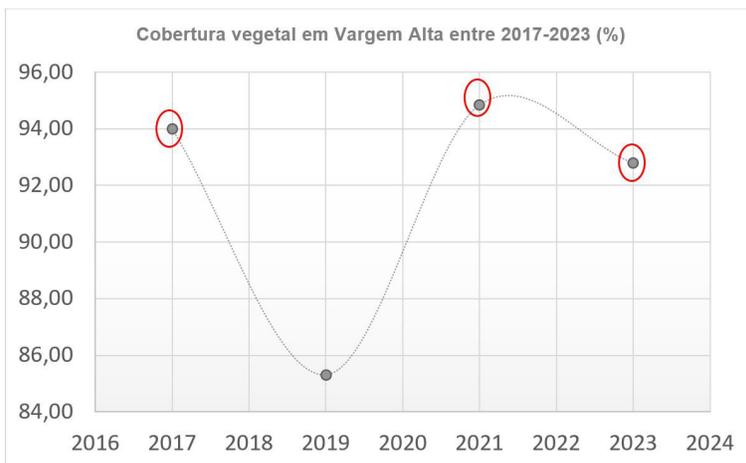
escoamento da água. A água que percorre nas fraturas pode enfraquecer ainda mais o maciço terroso e ocasionar movimentos de massa, especialmente em períodos de chuvas intensas.

A pluviosidade elevada, característica do clima Cfb da região, com chuvas bem distribuídas ao longo do ano (Incaper, 2023), intensifica o processo erosivo. Os maiores índices pluviométricos, principalmente nos meses de verão, aumentam o escoamento superficial, o que pode levar a formação de novas expressões erosivas.

Para realizar a classificação supervisionada de uso e ocupação do solo foram encontrados empecilhos. Estes devido a interferência de nuvens na imagem de satélite ou devido a classificação mais generalista do complemento *Semi-Automatic Classification Plugin* nas classes com similaridades espectrais de vegetação nativa e a agricultura.

Todavia, quando somadas os valores das duas classes, há uma variação mínima nos anos de 2017 (94%), 2021 (94,9%) e 2023 (92,8%) (Figura 7). A queda no percentual relativo ao ano de 2019 se justifica pela interferência de nuvens, que acabaram por aumentar a porcentagem de outras classes, como área urbana e corpos hídricos, e reduzindo os valores das classes que envolvem a cobertura vegetal. Com isso, o ano de 2019 não foi considerado.

Figura 7 – Variação de cobertura vegetal na área de estudo.



Fonte: Autores (2024).

Em relação ao percentual de terreno exposto (Figura 8), verifica-se acréscimo entre os anos de 2017 e 2021, seguido por um novo aumento em 2023. Este último sendo o pico registrado nesse estudo. Novamente, o ano de 2019 não foi considerado.

Figura 8 – Variação de terreno exposto na área de estudo.



Fonte: Autores (2024).

Apresenta-se neste momento, os possíveis motivos para a variação de terreno exposto:

- Práticas agrícolas: A intensificação da agricultura, com a expansão das áreas de cultivo e a redução das áreas de pastagem, pode ter contribuído para o aumento do solo exposto em alguns anos. Práticas como o desmatamento, a aração e a gradagem podem deixar o solo mais vulnerável à erosão.
- Intensidade das chuvas: O alto índice de precipitação em um único dia ou mês pode potencializar a erosão em solos rasos e desprotegidos, especialmente em áreas com declividade acentuada.

6 CONCLUSÃO

Este estudo investigou a ocorrência de feições erosivas em Vargem Alta (ES), identificando as relações entre estas e os componentes geológicos, pedológicos e pluviométricos do município.

O perfil do cambissolo, este sendo predominante no município, mostra um solo mal desenvolvido, assim como os neossolos. Ademais, os lineamentos presentes que refletem um comportamento de um relevo acidentado, induz a ação de movimentos de massa, por meio da reativação de falhas e fraturas. Estas também sendo facilitadores para o escoamento de água que podem acarretar a progressão de feições erosivas como sulcos para ravinas ou voçorocas.

As implicações práticas sugerem que ocorre na área um processo de erosão acelerado por ações antrópicas, principalmente quanto a práticas agrícolas e pecuárias.

Dessa forma, tecendo sugestões aos atores da comunidade, sugere-se para o controle da erosão a intensificação do plantio e manutenção de espécies vegetais nativas ou de gramíneas para a recuperação de áreas degradadas. Estas auxiliam a proteger o solo contra a ação erosiva devido às suas raízes mais profundas que podem trazer mais estabilidade ao maciço terroso.

Os resultados demonstram a necessidade de pesquisas futuras, com diferentes abordagens técnico-científicas, para identificar outros fatores que influenciam o surgimento e evolução de feições erosivas.

REFERÊNCIAS

BURGOS, C. D.; FORNACIARI, A.; WANDERLEY, C. T. **Caracterização dos patamares escalonados do sul capixaba com enfoque no estudo do processo de esfoliação em rocha (Espírito Santo-Brasil)**. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 4., 2006.

CARDOSO, R. S. B.; PIRES, L. V. **Voçorocas: processos de formação, prevenção e medidas corretivas**. Acesso em, v. 21, 2010.

CUNHA, A. M.; FEITOZA, H. N.; FEITOZA, L. R.; OLIVEIRA, F. S.; LANI, J. L.; CARDOSO, J. K. F.; TRINDADE, F. S. Atualização da legenda do mapa de reconhecimento de solos do estado do Espírito Santo e implementação de interface no Geobases para uso dos dados em SIG, 2016. **Revista GEONORTE**, v. 2, n. 22, 2021.

DANIEL, E.; VIEIRA, B. C.; MARTINS, T. D. Análise dos processos erosivos e deposicionais utilizando o modelo SIMWE (Simulated of Water Erosion). **Revista do Departamento de Geografia**, v. 41, p. e185794-e185794, 2021.

INSTITUTO CAPIXABA DE PESQUISA, ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL (INCAPER). **Programa de assistência técnica e extensão rural PROATER 2020-2023**. Vargem Alta, 2023. Disponível em: https://incaper.es.gov.br/media/incaper/proater/municipios/Vargem_Alta.pdf. Acesso em: 15 jun. 2024.

LIMA, J. F. V. de. Fisiografia da região média da bacia hidrográfica do rio Itapemirim, ES. 2021. 131 f. **Tese (Doutorado em Agronomia)** - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias, Alegre, 2021.

LOURENÇO, F. S. O lineamento Piúma: características gerais e história evolutiva no cenário tectônico da Província Mantiqueira Setentrional e margem continental. **Dissertação (Mestrado)** - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 172 p. 2015.

Moraes C. C. M. de et al. Carta geotécnica de aptidão à urbanização: Vargem Alta, ES. **CPRM**. 2024.

MOREIRA, E.; PIRES, P. M. Análise geotécnica do perfil de solo residual de granitoides no município de Alegre (ES). **Geotecnia (Lisboa)**, v. 1, p. 77-104, 2022.

QUARTAROLI, C. F.; BATISTELLA, M. **Classificação digital de imagens de sensoriamento remoto: tutorial básico**, 2006.

RADAMBRASIL. Folha S.F. 23/24 - Rio de Janeiro / Vitória. **Levantamento de Recursos Minerais**. Rio de Janeiro: MME-SG, v. 32, 775 p. 1983.

SANTOS, H. G.; ZARONI, M. J.; ALMEIDA, E. P. C. **Neossolo Litólico**. Embrapa Solos. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/solos-tropicais/sibcs/chave-do-sibcs/neossolos/neossolos-litolicos>. Acesso em: 01 jul. 2024.

SANTOS, H. G.; ZARONI, M. J.; ALMEIDA, E. P. C. **Cambissolo Háptico**. Embrapa Solos. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/solos-tropicais/sibcs/chave-do-sibcs/cambissolos/cambissolos-haplicos#:~:text=S%C3%A3o%20solos%20de%20fertilidade%20natural,pedras%20na%20massa%20do%20solo>. Acesso em: 01 jul. 2024.

VIEIRA, V. S.; SILVA, M. A.; CORRÊA, T. R.; LOPES, N. H. B. **Mapa Geológico do Estado do Espírito Santo**. Belo Horizonte: CPRM, 2018. Disponível em: <http://rigeo.sgb.gov.br/jspui/handle/doc/15564>. Acesso em: 10 jun. 2024.

CAPÍTULO 2

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDE NO MUNICÍPIO DE VARGEM ALTA (ES)

Data de submissão: 25/10/2024

Data de aceite: 14/11/2024

Éder Carlos Moreira

Professor Adjunto do curso de Geologia na Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)
Alegre – Espírito Santo
<http://lattes.cnpq.br/9650042242680161>

Eric José Cerqueira Gonçalves

Universidade Federal do Espírito Santo
Departamento de Geologia
Alegre - ES
<https://lattes.cnpq.br/4301579019364983>

Thiago Curty Vimercati

Universidade Federal do Espírito Santo
Departamento de Geologia
Alegre - ES
<http://lattes.cnpq.br/5508171303133497>

RESUMO: O município de Vargem Alta (ES) possui um padrão de ocupação característico de áreas montanhosas, tornando-o suscetível a inundações e deslizamentos, especialmente durante períodos de chuvas intensas. O presente trabalho buscou realizar uma caracterização geotécnica de algumas áreas críticas com deslizamentos no município, dando destaque aos ocorridos entre os

anos de 2020 e 2024. Para isso, foi feita a análise táctil visual do solo, classificação dos movimentos de massa e interpretação estrutural a partir dos lineamentos de relevo. Verificou-se que estes movimentos de massa são influenciados pela presença de estruturas reliquias no maciço terroso, como o bandamento gnáissico. Essas estruturas permitem movimentos planares, circulares ou rotacionais. Além disso, pôde-se observar tombamentos de blocos e fluxo de detritos, influenciados principalmente pelo sistema de fraturas e bandamento metamórfico. A partir disso, ficou evidente a necessidade de entender a natureza dessas áreas e os riscos associados, bem como a necessidade de um monitoramento contínuo das mesmas a fim de adotar medidas adequadas de prevenção e contenção, evitando danos sociais e econômicos.

PALAVRAS-CHAVE: Geotecnia. Riscos Geológicos. Deslizamentos. Movimentos de massa.

SLOPE STABILITY ANALYSIS IN THE MUNICIPALITY OF VARGEM ALTA (ES)

ABSTRACT: The municipality of Vargem Alta (ES) has an occupation pattern characteristic of mountainous areas, making it susceptible to floods and landslides, especially during periods of heavy rain. The present work sought to carry out a geotechnical characterization of some critical areas with landslides in the municipality, highlighting those that occurred

between the years 2020 and 2024. For this, visual tactile analysis of the soil, classification of mass movements and structural interpretation based on the relief lineaments. It was found that these mass movements are influenced by the presence of relict structures in the earth massif, such as the gneiss band. These structures allow planar, circular or rotational movements. Furthermore, block toppling and debris flow could be observed, mainly influenced by the fracture system and metamorphic banding. From this, it became evident the need to understand the nature of these areas and the associated risks, as well as the need for continuous monitoring of them in order to adopt appropriate prevention and containment measures, avoiding social and economic damage.

KEYWORDS: Geotechnics. Geological Risks. Slips. Mass movements.

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de compreender os processos de estabilização de taludes e suas medidas de contenção vem crescendo devido às consequências desastrosas causadas pelos movimentos de massa. Prevê-se um aumento na ocorrência desses eventos devido a três fatores principais: o contínuo crescimento da urbanização e desenvolvimento em áreas propensas a escorregamentos; o desmatamento constante e o aumento das taxas de precipitação resultantes das mudanças climáticas (Dyminski, 2007; Bonuccelli, 1999; Zuquette & Gandolfi, 2004).

O município de Vargem Alta, situado no estado do Espírito Santo, apresenta um padrão de ocupação característico de áreas montanhosas. As construções predominantemente estão localizadas próximas às drenagens, aproveitando as áreas mais planas dos vales com solos aluviais e colúviais. No entanto, é crucial ressaltar que essas áreas são altamente suscetíveis a inundações e movimentos de massa. Tais desastres podem acarretar em transtornos significativos e danos para a população e o setor público, especialmente durante períodos de chuvas acima da média pluviométrica (Oliveira Filho & Pedrazzi, 2021).

Pela análise dos deslizamentos ocorridos e a influência das estruturas reliquias nos horizontes do perfil de solo, buscou-se entender os fatores geotécnicos que contribuem para esses deslizamentos e desenvolver estratégias de prevenção e mitigação eficazes (Moreira, 2021).

O presente trabalho tem como objetivo realizar uma caracterização geotécnica das áreas críticas afetadas por deslizamentos no município de Vargem Alta. Foi realizada análises tátil-visual, acompanhada da coleta de amostras deformadas de solo. Os diferentes tipos de deslizamentos ocorridos foram classificados, e buscou-se estabelecer relações com as estruturas reliquias da rocha.

2 CONTEXTO GEOLÓGICO

A região localiza-se na Província Mantiqueira que, segundo Heilbron *et al.* (2004), desenvolveu-se durante a Orogenia Neoproterozoica Brasileiro - Pan Africana, a qual resultou na amalgamação do Paleocontinente Gondwana Ocidental (Almeida, 1977). Essa área encontra-se na parte sul do domínio interno do Orógeno Araçuaí, caracterizada principalmente por rochas graníticas e metamórficas de alto grau (Pedrosa-Soares *et al.*, 2007, apud Games *et al.*, 2018). As unidades litoestratigráficas que compreendem os pontos realizados neste estudo englobam o Complexo Nova Venécia e o Grupo Itálva - Unidade Serra da Prata (Vieira *et al.* 2018).

O Complexo Nova Venécia é constituído de paragneisses peraluminosos, ricos em biotita, cordierita, granada e/ou sillimanita, com intercalações de cordierita granulito e rocha calcissilicática (Gradin, 2013; Pedrosa-Soares *et al.*, 2006). Esta unidade compreende os gnaisses quartzosos, tratando-se de uma sequência pelito-areno-carbonática constituída predominantemente por granada-sillimanita (cordierita) gnaisses, localmente deformados, com intercalações de gnaisses calcissilicáticos, biotita-granada xistos, muscovita-xistos e quartzitos (Baltazar, 2010).

O Grupo Itálva foi definido pioneiramente por Machado Filho *et al.* (1983) como referência a um conjunto constituído de granada-hornblenda gnaisses, mármores e anfíbolitos; sendo individualizadas as seguintes unidades: Unidade São Joaquim; Unidade Macuco e Unidade Serra da Prata. A Unidade Serra da Prata está representada por gnaisses com composições que variam de tonalítica (gnaisse cinzentos mesocráticos) a granítica (gnaisse leucocráticos finos) e, como característica comum, apresentam bandamento marcante, cuja natureza pode ser tanto primária quanto migmatítica, predominantemente estromática.

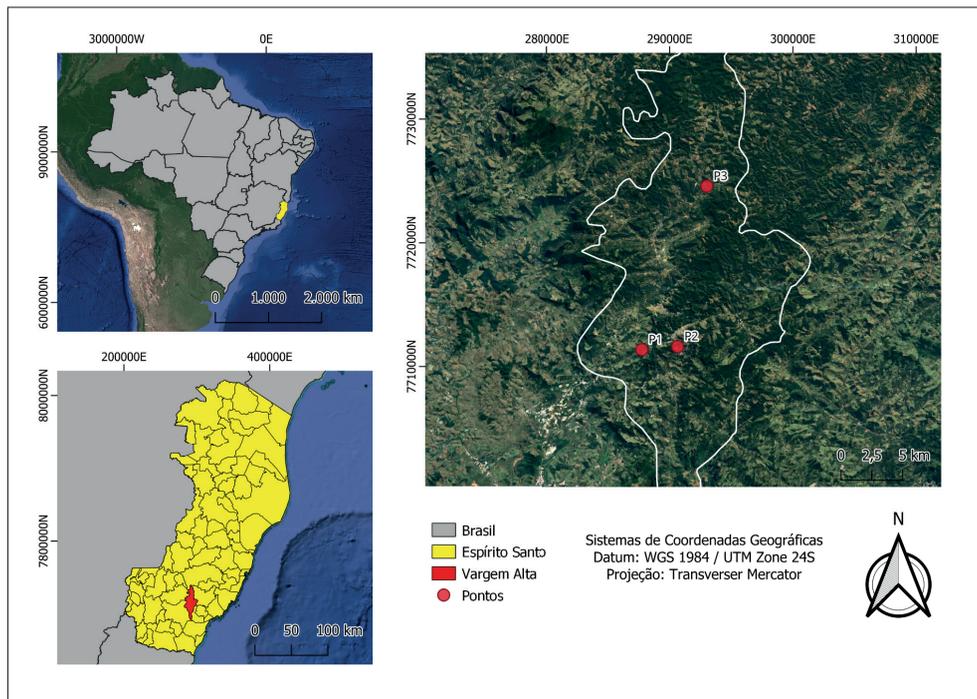
As estruturas reliquias destas rochas, podem influenciar no comportamento do maciço terroso, afetando propriedades geotécnicas como granulometria, permeabilidade, coesão, ângulo de atrito, entre outras. Sua influência parece estar diretamente ligada ao tipo de deslizamento ocorrido, seja ele planar, rotacional ou em forma de cunha (Paz, 2015).

3 METODOLOGIA

Inicialmente, foram realizadas pesquisas bibliográficas a fim de estabelecer uma base de dados sólida e atualizada, incorporando trabalhos de diversos autores como Moreira (2022), Oliveira e Pedrazzi (2021) e dados da CPRM (2021). Em seguida, foi

realizado um trabalho de campo nas áreas afetadas por movimentos de massa, com ênfase nos deslizamentos ocorridos entre os anos de 2020 e 2024. A Figura 1 apresenta um mapa de localização da área de estudo e os pontos dos campos experimentais que foram realizados na malha urbana.

Figura 1: Mapa de localização da região de estudo, Vargem Alta, localizado no sul do estado do Espírito Santo, Brasil. Fonte: modificado de IBGE (2022).



Foram realizadas análises geotécnicas dos perfis, permitindo a identificação das características das rochas e do solo. Para os solos, foi realizada uma análise táctil visual detalhada. Também foi realizada coleta de amostras deformadas para análise em laboratório, utilizando lupa binocular. Paralelamente, foi realizada uma fotointerpretação dos lineamentos por relevo sombreado, seguidas pela sua combinação e apresentação dos resultados no formato de “Rosetas”, com o objetivo de identificar os lineamentos predominantes na área de estudo e sua influência para os recorrentes processos analisados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No ponto 1, localizado próximo ao restaurante Hércio na Rodovia Gumercindo Moura Nunes (ES-164), encontrou-se um morro com gradiente muito elevado que possui diversas complicações geotécnicas. Neste local, observou-se cicatrizes de deslizamento

rotacional, marcada por degraus de abatimento pré-existentes, uma série de rastejos, bem como o tombamento de blocos e a erosão hídrica (Figura 2). Esses deslizamentos são influenciados principalmente pelas estruturas reliquias da rocha (bandamento gnáissico). O solo do talude em questão é um nitossolo vermelho e sua caracterização encontra-se na tabela 1.

Figura 2 - Ponto 1 próximo ao Restaurante Hélcio na Rodovia Gumercindo Moura Nunes (ES-164): A) Cicatriz de deslizamento circular e degraus de abatimento, encontrado na base do talude; B) Deslizamento planar ao longo da estrada; C) Erosão hídrica observados à medida que sobe o talude; D) Depósito de tálus e cicatriz de deslizamento rotacional influenciado pela estrutura reliquiar da rocha.

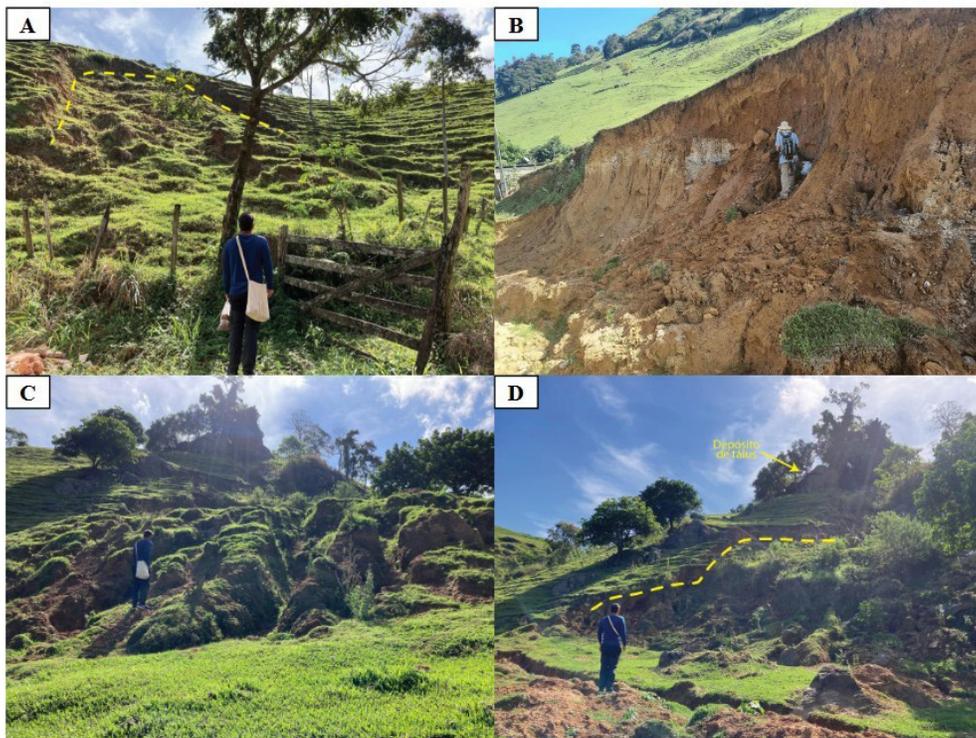


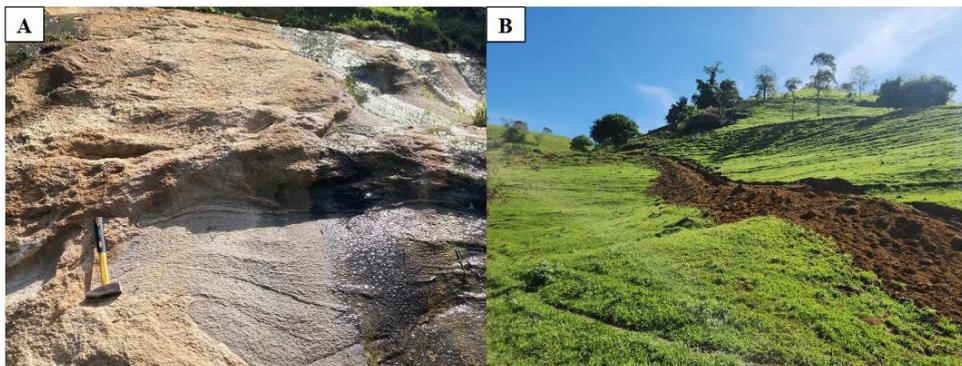
Tabela 1: Análise táctil visual do ponto 1.

Horizontes	Composição	Textura
A	Quartzo, argilo-minerais, muscovita, plagioclásio e matéria orgânica	Areia argilosa
B	Quartzo, muscovita, biotita, argilo-minerais e matéria orgânica	Argila siltosa
C	Quartzo, plagioclásio, biotita, muscovita, argilo-minerais e pouca presença de matéria orgânica	Areia siltosa

A rocha predominante na área é um gnaisse com feições de migmatização (Figura 3A), vista principalmente em uma drenagem com uma queda d'água, mais à esquerda do talude, com granulação fina a média, composta principalmente por quartzo, plagioclásio, k-feldspato, biotita e muscovita. Observou-se com frequência deslizamentos de pequena e grande magnitude, além de um notável rastejo, evidenciado por vários degraus de abatimento em diferentes posições. Nas cotas mais altas, encontrou-se um extenso depósito de tálus, com blocos que apresentam risco de tombamento e que acentuam os movimentos de massa no local. Os blocos rochosos promovem maior pressão no solo e no talude, possibilitando a instabilidade do terreno.

Moradores locais, a fim de conter a erosão no terreno, realizaram, logo abaixo destes blocos, a construção de cavas diretamente no solo, em dimensões métricas, criando um novo canal para o deslocamento da água (Figura 3B). Porém, esta medida não favorece a estabilização do talude, pois permite maior penetração das águas, promovendo linhas de fraqueza e possíveis planos de deslizamento, evidenciados pelos degraus de abatimento já existentes e promovendo também erosão hídrica.

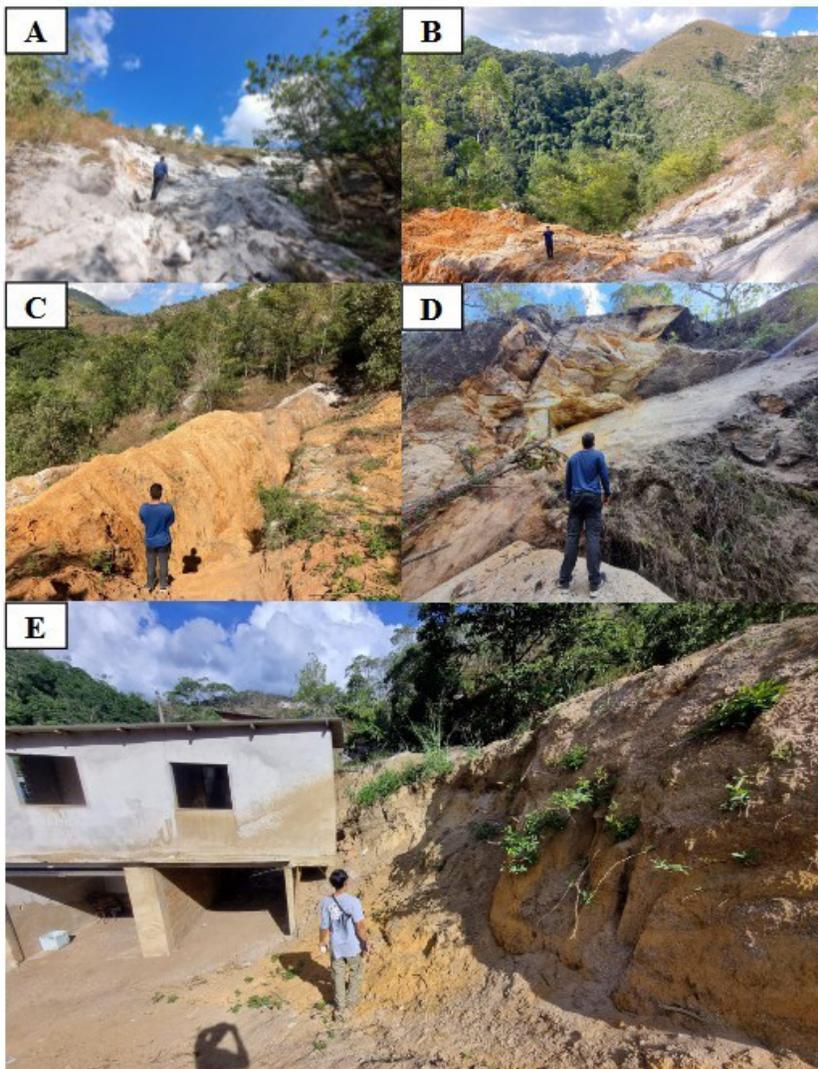
Figura 3: A) Rocha predominante no ponto 1, gnaisse com feições de migmatização; B) Cava construída por moradores a fim de conter a erosão no terreno do ponto 1.



Ao longo do ponto 2, localizado na comunidade Morro do Sal, foi possível identificar algumas consequências das fortes chuvas que atingiram o município em Março de 2024. Constatou-se principalmente uma grande corrida de massa, caracterizada como um fluxo de detritos, composto principalmente por areia grossa com pedregulho e cascalho de um quartzito presente no local. O quartzito encontra-se altamente friável e fraturado, com granulação grosseira. Observou-se que este fraturamento tenha facilitado a deflagração da corrida de massa. Essa corrida de massa atingiu todas as residências na área e como medida preventiva, a Secretaria Municipal

da Prefeitura de Vargem Alta construiu caixas secas (Figura 4C) para conter novas corridas de massa. Porém esta medida acaba não sendo eficaz, visto que essas caixas podem acumular excesso de água, sobrecarregando ainda mais o talude e promovendo novos deslizamentos e corridas de massa. Na base do talude, constituído por latossolo, foi observado um deslizamento do tipo planar que já começou a invadir as casas dos moradores (Figura 4E).

Figura 4 - Ponto 2 localizado na comunidade Morro do Sal: A e B) Visualização da corrida de detritos sobre o Quartzito; C) Cavas secas construídas a fim de conter os movimentos; D) Fraturas no Quartzito; E) Deslizamento planar invadindo casa dos moradores.



No ponto 3, localizado no bairro Taquarussu, foi analisado um grande deslizamento planar em meio às plantações de café, com erosão superficial e blocos rolados, apresentando feições de um Cambissolo (Figura 5). A tabela 2 esquematiza as propriedades gerais deste solo, e visualização detalhada dos horizontes (Figura 6).

Figura 5 - Ponto 3 localizado no bairro Taquarussu: A, B e C) Visualização do deslizamento planar em meio às plantações de café.

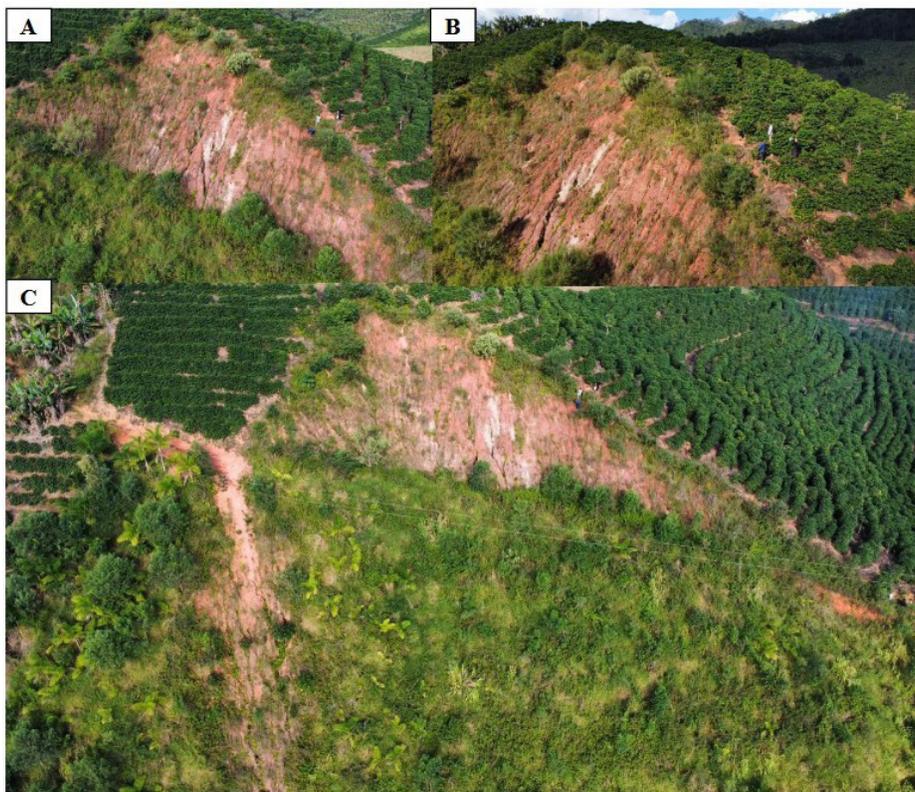
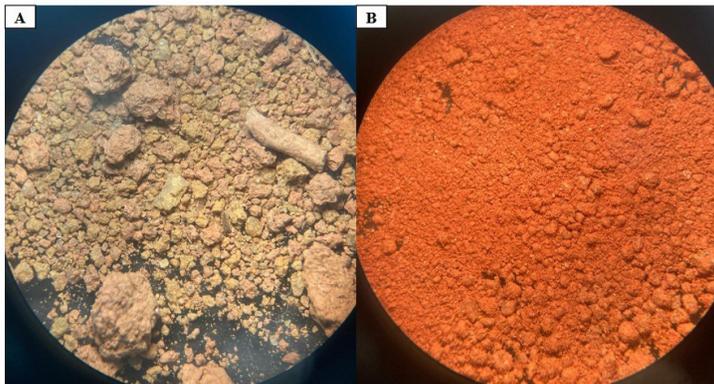


Tabela 2: Análise táctil visual do ponto 3.

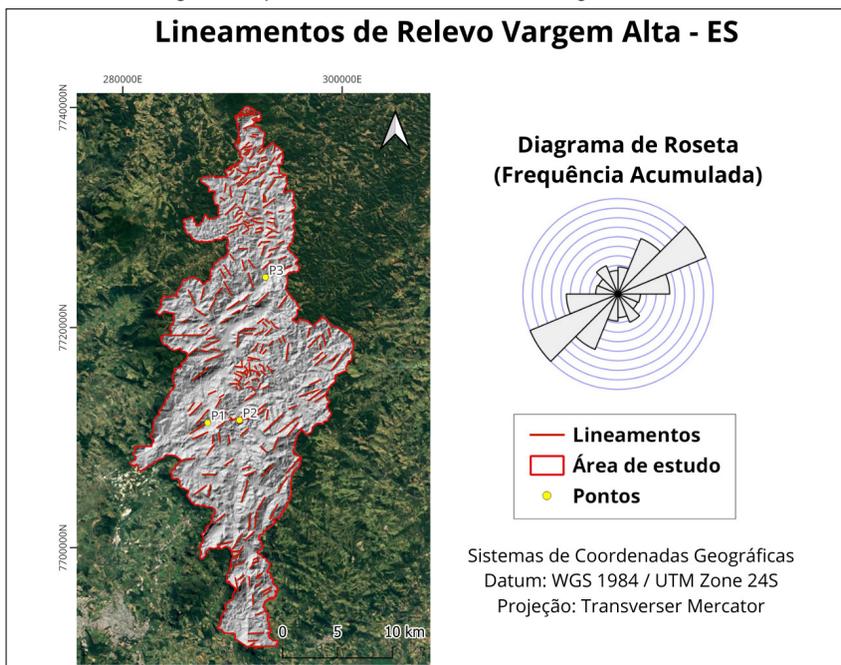
Horizontes	Composição	Textura
A	Quartzo, k-feldspato, plagioclásio, muscovita, argilo-minerais e matéria-orgânica	Areia siltosa
B	Quartzo, k-feldspato, muscovita, argilo-minerais e matéria-orgânica	Silte argiloso

Figura 6: A) Destaque do horizonte A encontrado no ponto 3, analisado em lupa binocular. B) Horizonte B encontrado no ponto 3 visto em lupa binocular.



Para compreender a influência da estrutura geológica nos movimentos de massa, foi realizada uma interpretação dos lineamentos de relevo, revelando um padrão preferencial de orientação NE-SW e uma direção secundária NW-SE (Figura 7). Medidas estruturais foram coletadas em campo nos pontos 2 e 3. No ponto 2, as medidas de fraturas no quartzito (330/58) mostraram correlação com os lineamentos de direção NE-SW. No ponto 3, as medidas dos planos de deslizamento (310/80) estão nessa mesma direção, mostrando que esse sentido preferencial está facilitando na deflagração de novos movimentos.

Figura 7: Mapa dos lineamentos de relevo de Vargem Alta - ES.



As investigações realizadas na região demonstraram que as estruturas reliquiárias da rocha influenciam significativamente os movimentos de massa, que inicialmente foram analisados apenas sob a ótica de deslizamentos. Contudo, observações de campo revelaram uma maior complexidade: os deslizamentos estão intimamente associados a fluxos de detritos, rastejos e erosão hídrica, manifestando-se por meio de sulcos e ravinas. Além disso, foram observados movimentos rotacionais, nos quais porções de solo se desprendem em blocos, girando em torno de um ponto de pivô. Assim, como discutido por Wicander e Monroe (2017), os movimentos de massa na área são complexos, com rastejos que podem evoluir para deslizamentos (rotacionais ou planares) e subsequentes fluxos de detritos, seguidos por novos rastejos ou outras formas de movimento.

Observou-se ainda uma discrepância entre as classificações de solos estabelecidas por este autor e referências, como Cunha *et al.* (2016), atribuída à variação de escala de trabalho. Em escalas mais detalhadas, é possível identificar variações laterais dentro de um mesmo talude, o que não invalida, no entanto, os diferentes critérios de classificação.

5 CONCLUSÕES

As estruturas reliquiárias da rocha influenciam significativamente os movimentos de massa na região, com o bandamento gnáissico desempenhando um papel crucial, especialmente em deslizamentos planares e rotacionais, confirmando a complexidade dos processos observados, especialmente no Morro do Sal.

O estudo dos lineamentos revelou a predominância de feições orientadas preferencialmente na direção NE/SW, correlacionadas com o deslizamento na Comunidade de Taquarussu, e pelo padrão de fraturamento no acamamento do quartzito.

Os tipos de solos identificados (nitossolo vermelho, latossolo amarelo e cambissolo háplico) apontam para diferentes graus de estabilidade de taludes, sendo que o cambissolo apresenta maior propensão a movimentos de massa e erosão, especialmente quando o horizonte C está exposto. É possível observar isso também no perfil do nitossolo vermelho.

Recomenda-se que os resultados deste estudo sejam comunicados à Prefeitura Municipal de Vargem Alta e à Defesa Civil do Município. Há também uma oportunidade para expandir este trabalho a outros municípios do Espírito Santo, com levantamentos detalhados que possam contribuir para a criação de um banco de dados. Este banco de dados ajudaria a identificar e correlacionar movimentos de massa com os tipos de solos e rochas no estado, fornecendo uma ferramenta valiosa para a mitigação de riscos geotécnicos e planejamento urbano e rural.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores assumem a responsabilidade por este trabalho, e agradecem à Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) por proporcionar um ambiente propício para o desenvolvimento desta pesquisa, bem como pelo acesso aos laboratórios e materiais necessários.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA F. F. M.. **O CRÁTON DO SÃO FRANCISCO**. Revista Brasileira de Geociências, v. 7, n. 4, p. 349-364, 1 set. 1977. Sociedade Brasileira de Geologia.

BALTAZAR, O. F.; ZUCCHETTI, M.; OLIVEIRA, S. A. M. de; SCANDOLARA, J.; SILVA, L. C. **Geologia das folhas São Gabriel da Palha SE.24-Y-C-III e Linhares SE.24-Y-D-I: projeto São Gabriel da Palha - Linhares, estados do Espírito Santo e Minas Gerais**. Belo Horizonte: CPRM, 2010. 144 p., il. Escala 1: 100.000. Levantamentos Geológicos Básicos. Programa Geologia do Brasil.

BONUCCELLI, T. J. **Estudo dos movimentos gravitacionais de massa e processos erosivos com aplicação na área urbana de Ouro Preto (MG) – Escala 1:10.000**. Tese de Doutorado. EESC-USP. Vol I. 208p. 1999.

CUNHA, A. de M.; FEITOZA, H. N.; FEITOZA, L. R.; OLIVEIRA, F. S. de.; LANI, J. L.; CARDOSO, J. K. F.; TRINDADE, F. S. **Atualização da legenda do mapa de reconhecimento de solos do Estado do Espírito Santo e implementação de interface no Geobases para uso de dados em SIG**. Geografares, Vitória, v. 2, n. 22, p. 32 a 65, jul.- dez. 2016.

DYMINSKI, Andréa Sell. **Noções de estabilidade de taludes e contenções**. Universidade Federal do Paraná, Notas de Aula, Estabilidade de Taludes. 28p, p. 61, 2007.

GAMES, L. F. M.; MEDEIROS JÚNIOR, E. B. de; MARQUES, R. de A.; NUNES, V. R. N. **Caracterização petrográfica e estrutural dos mármore e rochas associadas situados nos arredores do município de Vargem Alta - ES**. In: Mapeamento Geológico e Geologia Regional - Vol 1. 2018. Disponível em: dspace3.ufes.br/bitstream/10/10504/1/LIVRO_Mapemanto_Geologico_E_Geologia_Regional_V1.pdf

GRADIM C. T. 2013. **Complexo Nova Venécia e magmatismo associado, Orógeno Araçuaí, estado do Espírito Santo**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, 98 p.

HEILBRON M., PEDROSA-SOARES, A.C. CAMPOS-NETO M.C., SILVA L.C., THROUWT R., JANASI V.A. 2004. **Provincia Mantiqueira**. In: V. Mantesso-Neto, A. Bartorelli, C.D.R. Carneiro, B.B. Brito-Neves (org.), **Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. São Paulo, Beca Produções Culturais Ltda, v. único, cap. XIII, p. 203-234.

MACHADO FILHO, L.; RIBEIRO, M. W.; GONZALES, S. R.; SCHENINI, C. A.; SANTOS NETO, A.; PALMEIRA, R. C. B.; PIRES, J. L.; TEIXEIRA, W.; CASTRO, H. E. F. **Geologia**. In: BRASIL. Departamento Nacional da Produção Mineral. **Projeto RADAMBRASIL: folhas SF.23/24 Rio de Janeiro/Vitória**. Rio de Janeiro, 1983. v. 32, p. 27-304. (Levantamento de Recursos Naturais, 32).

MOREIRA, E. C. **Relatório de Licença Capacitação “Análise Geotécnica do perfil de Nitossolo vermelho no Município de Alegre (ES)”**. Departamento de Geologia, junho-agosto/2021.

MOREIRA, ÉDER; MOREIRA PIRES, PATRÍCIO JOSÉ. **Análise geotécnica do perfil de solo residual de granitoides no município de Alegre (ES)**. GEOTECNIA (LISBOA), v. 1, p. 77-104, 2022.

OLIVEIRA FILHO, Ivan Bispo de; PEDRAZZI, Anselmo. **Setorização de áreas de risco geológico: Vargem Alta, Espírito Santo**. Nov-2021. CPRM. Relatório Técnico. Disponível em: <<https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/19736.2>>.

PAZ, VALMOR MADEIRA et al. **Levantamento das descontinuidades e avaliação da estabilidade de taludes da mina do Mangueirão**. Revista Monografias Ambientais, p. 98-115, 2015.

PEDROSA-SOARES, A. C.; CASTAÑEDA, C.; QUEIROGA, G.; GRADIM, C.; BELÉM, J.; RONCATO, J.; NOVO, T.; DIAS, P. H.; GRADIM, D.; MEDEIROS, S.; JACOBSON, T.; BABINSKI, M.; VIEIRA, V. S. **Magmatismo e tectônica do orógeno Araçuaí no extremo leste de Minas Gerais e norte do Espírito Santo (18°-19° S, 41°-40°30' W)**. Geonomos, Belo Horizonte, v.14, n. 2, p.97-111, 2006.

PEDROSA-SOARES, A. C.; NOCE, C. M.; ALKIMIM, F. F.; SILVA, L. C.; BABINSKI, M.; CORDANI, U.; CASTAÑEDA, C. **Orógeno Araçuaí: síntese do conhecimento 30 anos após Almeida 1977**. Geonomos, Belo horizonte, v.15, n.1, p.1-16, 2007b.

VIEIRA, V. S.; SILVA, M. A.; CORRÊA, T. R.; LOPES, N. H. B. **Mapa Geológico do Estado do Espírito Santo**. Belo Horizonte: CPRM, 2018.

ZUQUETTE, Lázaro V.; GANDOLFI, Nilson. **Cartografia geotécnica**. São Paulo: Oficina de Textos, 2004. (ISBN: 978-85-8623-838-3).

CAPÍTULO 3

CONTRIBUIÇÃO PARA O ZONEAMENTO DE RISCO DE INUNDAÇÕES URBANAS NO MUNICÍPIO DE LICHINGA, PROVÍNCIA DE NIASA, MOÇAMBIQUE

Data de submissão: 04/11/2024

Data de aceite: 22/11/2024

Americo José Fombe
Universidade Lúrio
Moçambique

Gustavo Sobrinho Dgedge
Universidade Pedagógica
Moçambique

RESUMO: As discussões e reflexões a cerca dos desastres naturais e configuração de áreas de risco, cada vez mais figuram-se como temas significativos, no meio académico, onde os processos, dinâmicas e relações que ocorrem nestes espaços são discutidos e pensados, tendo como foco tanto as populações envolvidas como o ambiente em questão. O trabalho foi feito por 1 estudante do doutoramento em geografia e 1 docente do mesmo curso. O principal objectivo foi de Desenvolver uma metodologia para o zoneamento do risco de inundações urbanas para o Município de Lichinga. Procurou-se defender uma abordagem onde a gestão do risco de inundações urbanas deve combinar medidas estruturais e medidas não

estruturais com uma visão dos impactos na infra-estrutura e também na população, de modo a reflectir em como tornar as políticas existentes mais efectivas. O conhecimento do risco de inundações e das vulnerabilidades da população ou de determinada área, bem como da capacidade de resiliência, são importantes mecanismos de defesa. É nesse contexto que acções preventivas podem reduzir substancialmente os prejuízos causados pelas inundações. Entretanto, este é um problema complexo que sofre limitação de meios humanos e técnicos para o seu controle, bem como mudanças de comportamento e muitas vezes altos investimentos. Assim, como desafio para a gestão de riscos de inundações nas áreas urbanas, requerem-se acções integradas entre os entes estatais e ainda políticas de planeamento voltadas para a diminuição dos possíveis impactos socioeconómicos. Sendo ainda de fundamental importância aliar essas acções públicas com o engajamento político das comunidades vulneráveis, assegurando a sua participação activa, principalmente aquelas que estejam em locais de riscos, pois garante maior efectividade no uso das informações e na tomada de decisões, estabelecendo uma cultura de risco, que incorpore toda a sociedade. Dessa maneira, desde que haja dados cadastrais actualizados, a presente metodologia pode ser aplicada em qualquer município deste belo Moçambique.

PALAVRAS-CHAVE: Danos. Inundações urbanas. Risco. Metodologia.

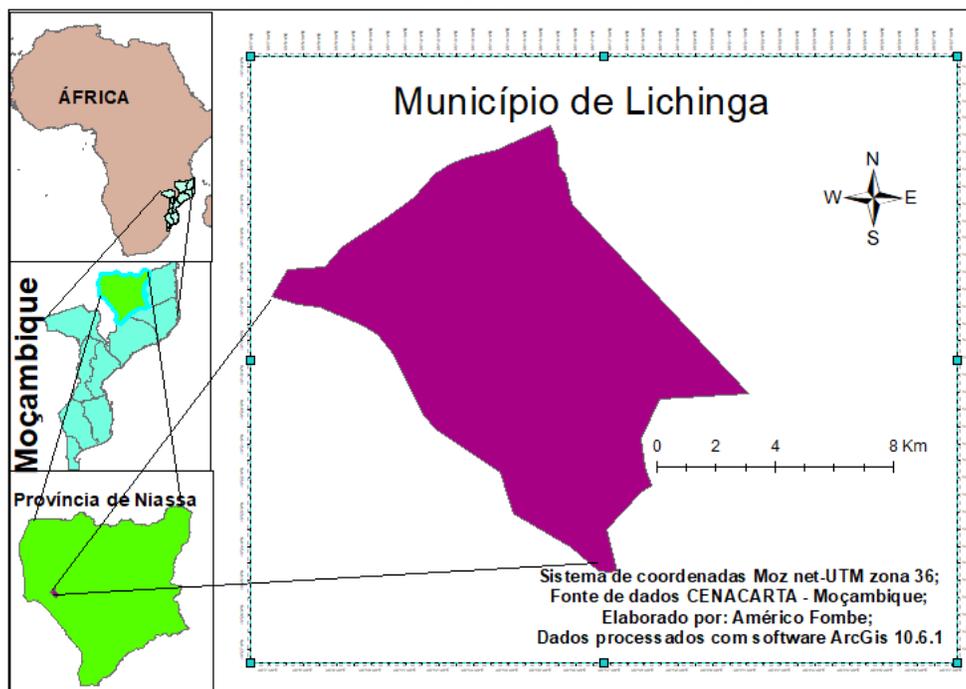
1 INTRODUÇÃO

As inundações são fenómenos de origem naturais inevitáveis, e nas últimas décadas, têm-se destacado na comunidade científica como um dos principais desastres de origem natural que afectam áreas urbanas, gerando impactos severos nas vidas humanas e nas infra-estruturas. Esses eventos, ao serem considerados como desastrosos, são o resultado de uma combinação de factores naturais e antrópicos, que, com o passar do tempo, têm-se intensificado devido às rápidas transformações ambientais e à crescente urbanização.

No caso do Município de Lichinga, é de extrema importância realizar investigações junto às populações expostas a esses riscos para compreender as motivações que as levam a ocupar áreas susceptíveis a desastres de origem naturais e avaliar seu conhecimento sobre as ameaças a que estão expostas. Este conhecimento é uma etapa fundamental na elaboração de planos de ordenamento do território e gestão de áreas de risco, contribuindo para a mitigação dos impactos negativos desses fenómenos em áreas urbanas.

2 LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA

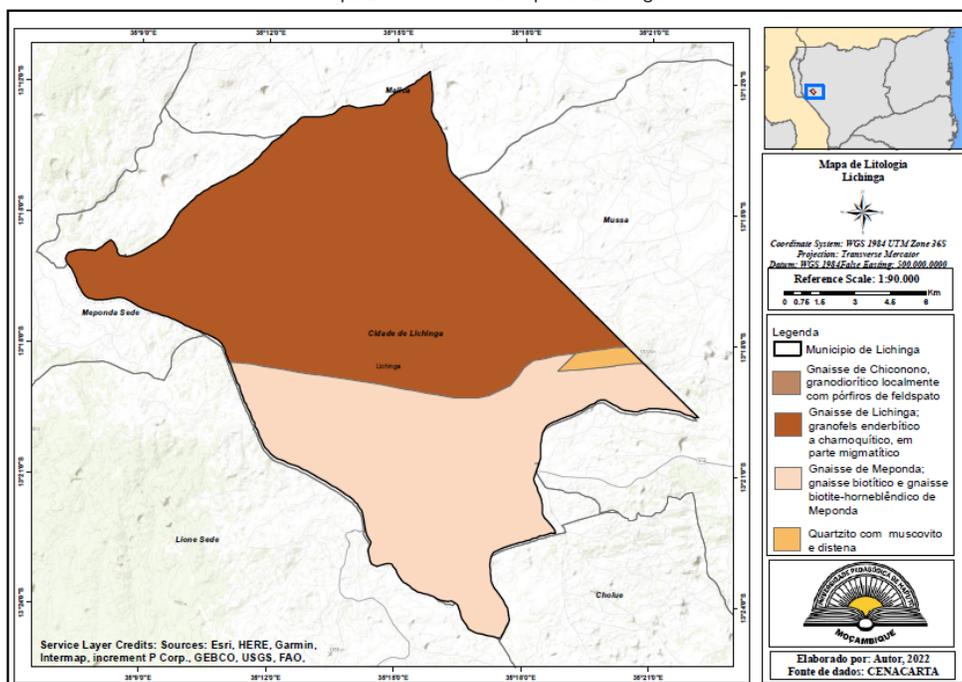
Mapa 1: Mapa da localização geografia do Município de Lichinga.



O Município da Cidade de Lichinga, cidade capital da província de Niassa, situa-se na região norte da República de Moçambique, entre as coordenadas 13,18 Latitude Sul e 34,14 longitude Leste, a uma altitude de 1.358 metros. Lichinga dista cerca de 50 km da margem Leste do Lago Niassa em linha recta e, consequentemente foram instituídos 4 Postos Administrativos e estruturados em 15 bairros comunais. Em termos de limites a cidade de Lichinga é contornada totalmente pelo distrito de Chimbonila, designadamente: a Norte pela localidade de Lussanhando, a Este pelos Postos Administrativos de Lione e Meponda, a Sul e a Este pela Sede do distrito de Chimbunila. Esta cidade, que é a capital da província do Niassa, faz entroncamento de estradas e testa da mais extensa via férrea do Corredor do Desenvolvimento Norte (CDN). (CMCL, 2014).

3 RELEVO DO MUNICÍPIO DE LICHINGA

Mapa 2: Relevo do Município de Lichinga.



A cidade de Lichinga possui uma morfologia característica de planalto, desenvolvendo-se na sua maioria no sentido Norte-Sul, com uma vasta superfície aplanada localizada na parte central, bem como se observam zonas de planícies interceptadas pelos principais cursos de água. Há ocorrência de declives escarpados, concentrando-se na sua maioria, na parte oriental, e a proliferação de blocos intrusivos resultantes de processos característicos da região. As altitudes variam de 980 m a 1520 metros.

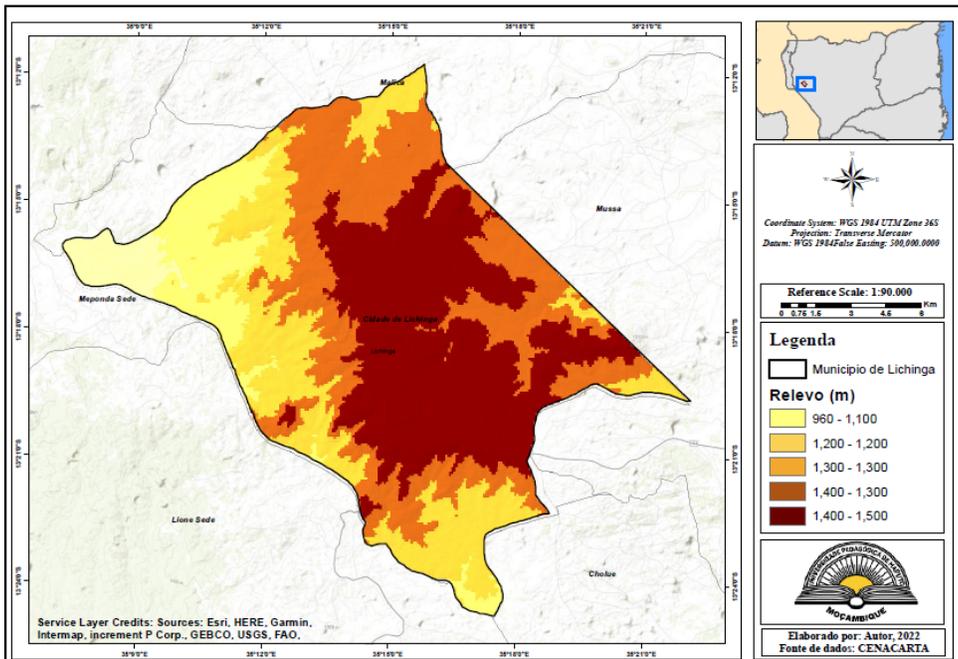
Em relação a necessidade de efectuar a ocupação urbana em observância as características do relevo, a partir de Shutzer (2012), as áreas non aedificandi constituem as terras ambientalmente sensíveis, de conservação ou primordiais à ocorrência de processos naturais, indicadas para ocupações “verdes”, por exemplo, as áreas junto às redes de drenagem natural, bem como as áreas de forte declividade.

Portanto, trata-se de áreas que podem ser indicadas para tipos de ocupação que atendem fundamentalmente a função ambiental, necessária aos equilíbrios ecológicos e à sobrevivência do Homem, bem como áreas que podem ser voltadas para a função produtiva, no exemplo do desenvolvimento da agricultura. Quanto às áreas edificáveis, tratar-se de terras em que é encorajado o desenvolvimento de edificações antrópicas (áreas urbanizadas).

Estudar a permeabilidade da litologia que compõe o território é algo significativo quando se trata de risco de inundações. A permeabilidade consiste na maior ou menor capacidade de uma rocha permitir a passagem de água, sem alterar a sua estrutura. Quanto mais permeáveis forem as rochas maior é a infiltração e, conseqüentemente, menor é o escoamento superficial. Por outro lado, quanto mais impermeáveis forem as rochas, menor é a infiltração e, a escorrência será maior, influenciando as águas à superfície.

4 HIPSOMETRIA

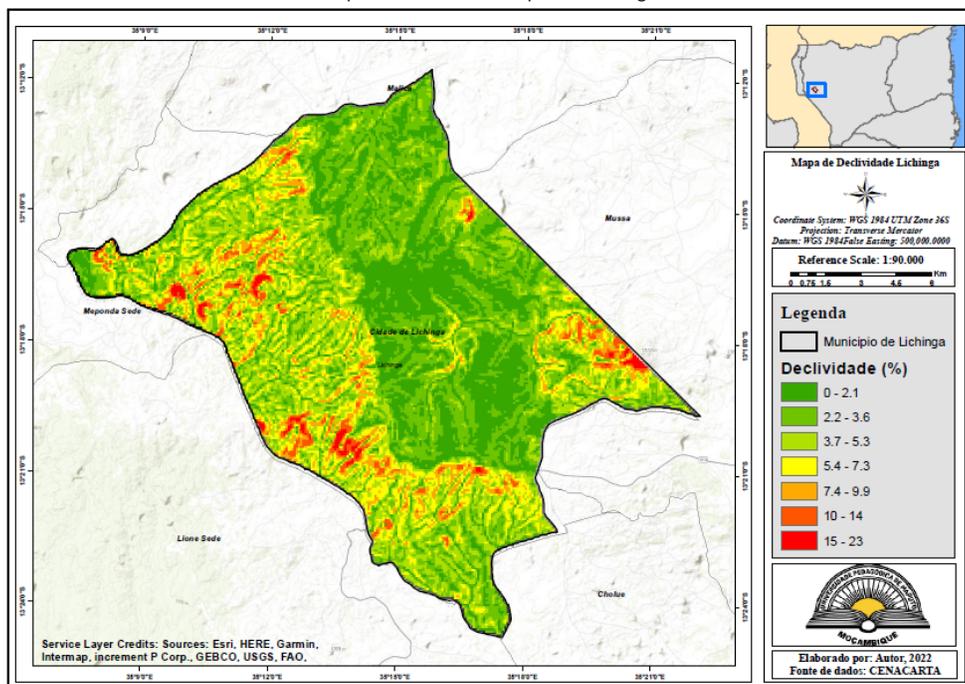
Mapa 3: hipsometria do Município Lichinga.



O território está localizado numa região altiplanáltica com uma altitude variando entre 960 a 1.380 metros acima do nível do mar. É predominado por interflúvios, encostas médias e superiores e vales dos rios. Usando a classificação sistemática de avaliação da aptidão física dos solos de Filho e Beek (1995), podemos dizer que a maior parte da sua extensão territorial é formada por terras caracterizadas entre pouca a moderada susceptibilidade à erosão, isto é, o território é predominado por superfícies com declives que variam entre 0 e 13%. É nesta superfície do território (declividade entre 0 e 13%) que está localizado o principal ambiente construído da cidade de Lichinga (uso habitacional).

5 DECLIVES

Mapa 4: Declives Município de Lichinga.



O ambiente SIG do ArcGIS foi seleccionado para a criação e utilização dos mapas, compilação de dados geográficos e para a análise das informações mapeadas. Os *softwares* utilizados para a geração da modelagem hidrológica (HEC-HMS) e hidrodinâmica (HEC-RAS) constituem a metodologia adoptada para identificar as áreas de perigo de inundação no perímetro urbano, conforme será detalhado.

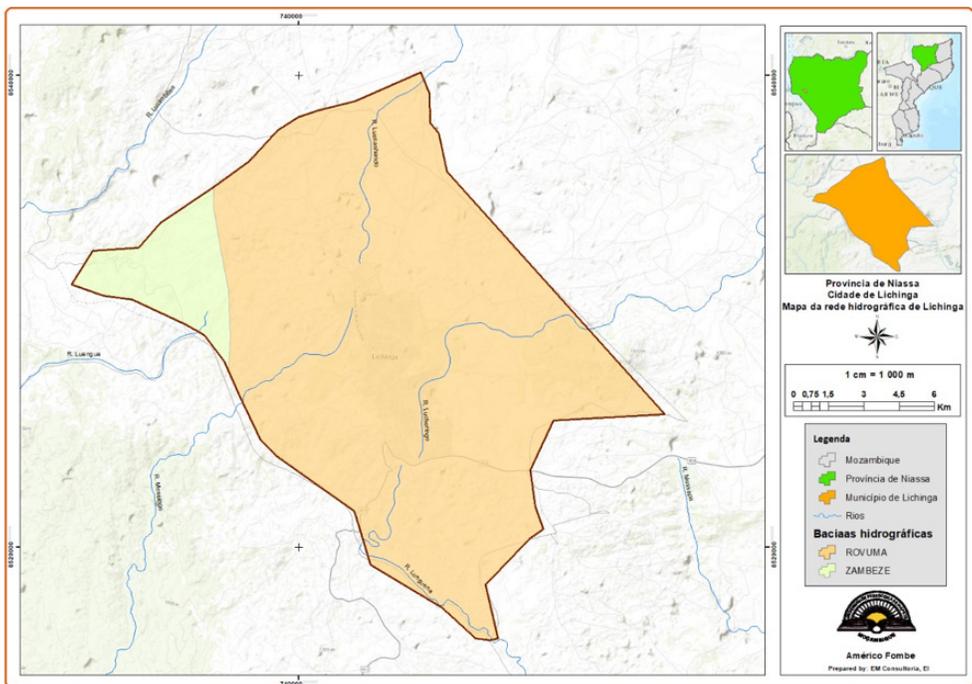
Por meio da aplicação das técnicas e ferramentas do ArcMap 10.6.1 foi gerado o Modelo Digital de Elevação (MDE) da área de estudo, utilizando-se a base cartográfica do perímetro urbano, do Município de Lichinga.

A geração do modelo digital do terreno foi o primeiro procedimento para a geração do modelo para gestão de riscos de inundações urbanas na área de estudo, resumido na sequência metodológica.

A maior bacia hidrográfica que banha o território da cidade é a do Lucheringo que tem como afluentes em território da cidade, os rios Namacula, Nangala e Mitava. Devido ao tipo de clima que é tropical, caracterizado por apresentar duas estações distintas ao longo do ano (seca e chuvosa) os rios são de regime periódico isto é, apresentam caudais consideráveis na época chuvosa entre os meses de Novembro a Abril. E devido ainda à morfo-estrutura como referimos, caracterizada por interflúvios, encostas superiores e vales, os rios apresentam na maior parte dos seus percursos fluxos turbulentos que favorecem o aumento da velocidade de progressão das cheias.

6 REDE HIDROGRÁFICA

Mapa 5: Rede hidrográfica do município de Lichinga.

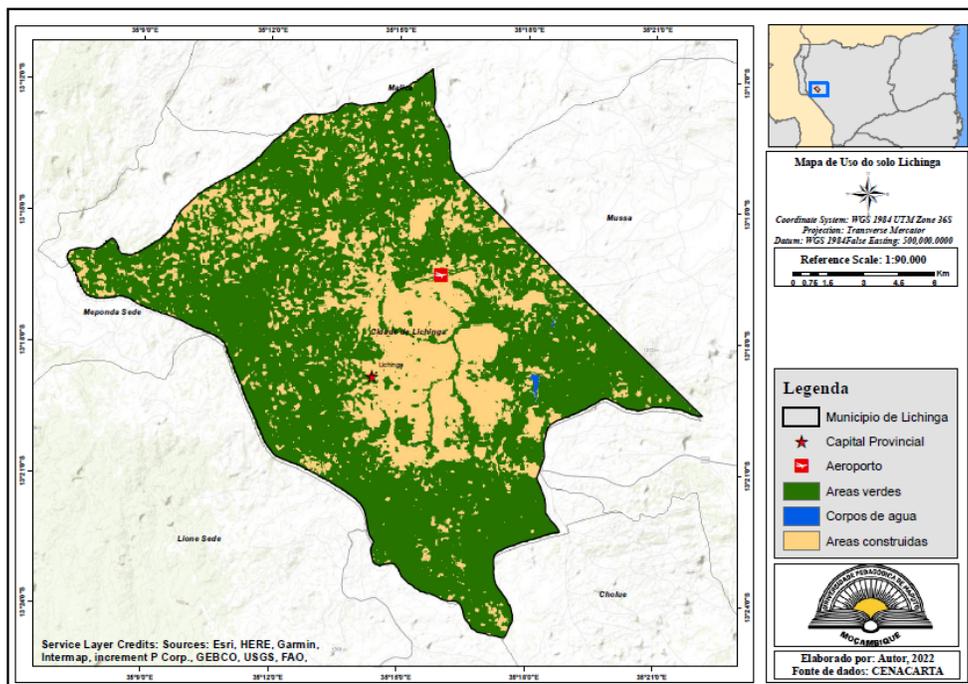


Devido ao predomínio de formações geológicas de rochas ácidas, ocorrem na cidade de Lichinga solos argilosos vermelhos óxicos. São solos profundos, de boa drenagem e de matéria orgânica entre baixa a moderada. As suas limitações agroecológicas são a fixação de fósforos e a baixa fertilidade. Nas formações geológicas

com predomínio de superfícies montanhosas, ondulações superiores a 30% e zonas erosionadas ocorrem solos líticos (leptosolos, solos franco-arenosos, castanhos e pouco profundos (0-30 cm), possuem uma drenagem excessiva e matéria orgânica entre baixa a moderada. As suas principais limitações são a pouca profundidade e o risco maior de erosão.

7 SOLOS

Mapa 6: Solos do Município de Lichinga.



A variação das características e propriedades do solo em dado local guarda relação com as componentes do ambiente circundante, os processos genéticos de formação do solo. Neste sentido, a qualidade e característica do solo num dado local será o resultado de factores naturais e antrópicos.

O solo constitui um sistema heterogéneo e anisotrópico, isto é, ocorrem variações laterais no corpo do solo que são progressivas e descontínuas e, por outro lado, em profundidade o solo se diferencia em camadas mais ou menos paralelas à superfície denominadas horizontes. Assim, o conhecimento da variabilidade espacial dos solos, seu detalhamento, é fundamental, especificamente para fins de orientação dos usos e ocupação do solo. Contudo, neste trabalho apresentamos uma caracterização dos solos muito generalizada, pela ausência de dados.

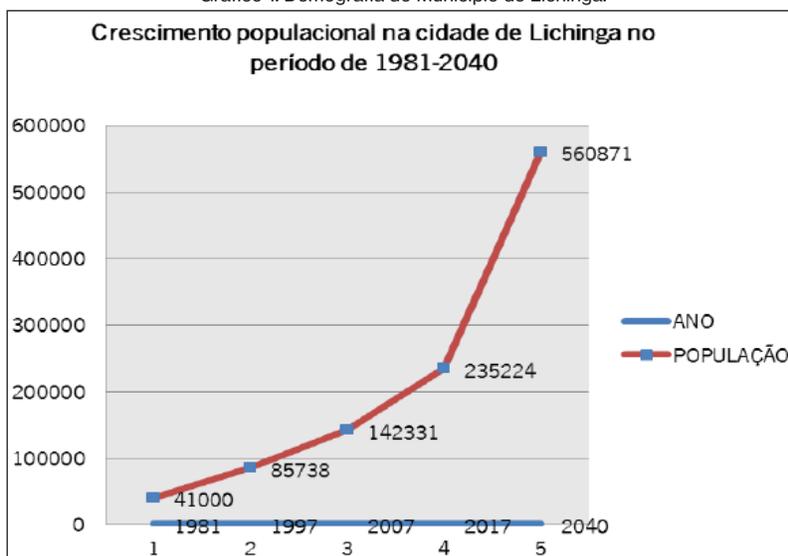
Para Muchangos (1999), segundo a localização geográfica e astronómica, Moçambique possui uma grande diversidade de solos típicos das regiões tropicais e subtropicais. A repartição territorial dos solos corresponde, em grande medida, à estrutura geológica e climática de Moçambique, sendo também influenciado pela altitude, topografia e continentalidade.

De maneira geral, na composição mineralógica dos solos moçambicanos predominam materiais ferruginosos e aluminosos, sendo por isso, considerados pedalféricos ou ferralíticos. Estes solos são também chamados latossolos pela frequência de sua ocorrência sob a forma de material endurecido conhecido por laterite. Nas regiões de grande altitude (no exemplo da cidade de cidade de Lichinga) os solos contem laterites ou material latérico. Estes solos são, de maneira geral, ricos sob o ponto de vista agrícola. É nestes solos típicos que se desenvolvem as culturas de maior significado económico, tais como o milho, tabaco, chá, algodão e fruteiras.

Segundo a interpretação da carta temática de solos a cidade de Lichinga é caracterizado pela predominância de solos argilosos vermelhos tóxicos, cobrem a maior parte da cidade de Lichinga, numa área de 212 km².

8 DEMOGRAFIA

Gráfico 1: Demografia do Município de Lichinga.



De acordo com o Instituto Nacional de Estatística em 2017 o Município de Lichinga possuía uma população com 204 720 habitantes, um valor que corresponde a um aumento do efectivo na ordem dos 65% quando comparado com o tamanho da

população registado em 2007 (INE, 2010a). No entanto, Lichinga é a cidade com menor densidade populacional entre as cidades capitais das províncias do Norte do país e está entre as seis cidades capitais provinciais de Moçambique com densidade populacional inferior a 1.000 hab./km².

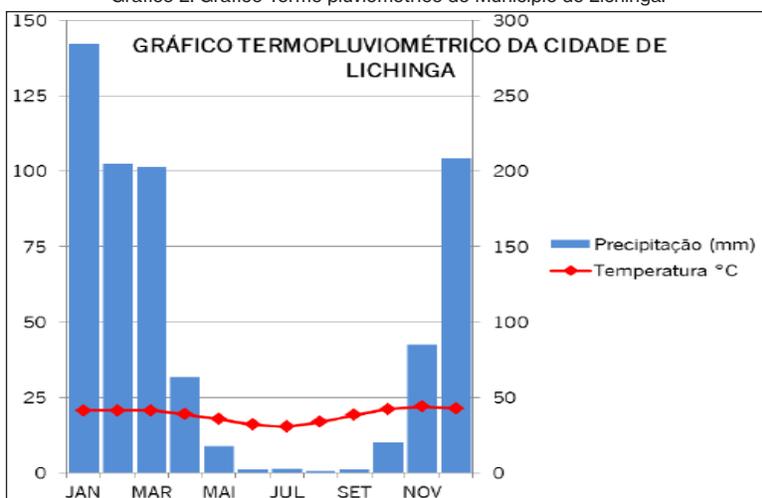
A compreensão da composição e dinâmica da população, bem como o entendimento dos aspectos económicos do Município da Cidade de Lichinga são relevantes no apoio à fundamentação dos pressupostos deste artigo, especificamente.

Na cidade de Lichinga, de entre os vários grupos etnolinguísticos que habitam esta cidade, destacam-se os Yao ou Ajaua. Como caracteriza Loureiro, o grupo etnolinguístico Ayao constitui a larga maioria no planalto e na cidade, seguido de agrupamentos minoritários, os nianjas, os macuas, havendo a registar um pequeno grupo de angones. Os Ayao mantinham relações comerciais com os árabes de Quíloa e, a partir do séc. XVII, com os portugueses estabelecidos na Ilha do Ibo e na Ilha de Moçambique, vendendo-lhes escravos e marfim.

Segundo dados do Instituto Nacional de Estatísticas (INE), em 37 anos, entre 1980 e 2017, a população da cidade de Lichinga teve um aumento de pouco mais de 470%, isto é, a população quase quintuplicou nesse período. Em 1980 a população da cidade de Lichinga era de 41.000 habitantes, passando para 85.738 em 1997, dez anos depois passou para 142.331 habitantes. Segundo dados de projecção da população, o tamanho da população na cidade de Lichinga será de 235 224 habitantes, em 2017 e, mais que duplica 23 anos depois, passando para 560 871 habitantes.

9 CLIMA

Gráfico 2: Gráfico Termo pluviométrico do Município de Lichinga.



Em termos zonais, distinguem-se em Moçambique quatro tipos de clima, do tipo tropical nomeadamente: clima tropical modificado pela altitude, tropical húmido, tropical seco e tropical semiárido. Dada à sua localização, o clima da cidade de Lichinga é o que corresponde à situação do território na zona intertropical e numa área de planalto. Assim, o clima da cidade de Lichinga é classificado como Tropical húmido modificado pela altitude, caracterizado por apresentar duas estações nítidas ao longo do ano, uma quente e chuvosa (de Outubro a Março) e outra fria e seca (de Abril a Setembro), apresenta temperaturas médias anuais inferiores a 18oC e precipitação superior a 1200, chegando a atingir os 2000mm (MINED, 1986 e MUCHANGOS, 1999).

Face às características gerais dos tipos de clima, segundo Ministério para a Coordenação da Acção Ambiental (MICOA), a cidade de Lichinga está inserida na zona agroclimática Norte do rio Zambeze, caracterizada por disponibilidade de água para as culturas nas épocas das chuvas, com mais de 80% de probabilidades das necessidades mínimas de água ser suficiente para todo o ciclo vegetativo, ou seja, somente dois em cada 10 anos podem ocorrer problemas de défice hídrico. (MICOA, 2002). A variação temporal da precipitação na cidade de Lichinga permite verificar que ao longo do ano registam-se 4 meses (Junho-Setembro) em que os valores de precipitação são críticos para o desenvolvimento das culturas.

10 CONTRIBUIÇÃO PARA O ZONEAMENTO DO RISCO DE INUNDAÇÃO NO MUNICÍPIO DE LICHINGA

A contribuição para o zoneamento do Risco de Inundação no Município de Lichinga parte do pressuposto que as relações ambientais e socioeconómicas são interdependentes, ou seja, os impactos negativos e positivos devem ser estudados levando-se em conta os factores ambientais e socioeconómicos do espaço referido.

A contribuição foi elaborada e pensada de acordo com as especificidades do Município de Lichinga. Considerando que cada lugar possui dinâmicas e características particulares, esta tese almejou adequar uma metodologia já consagrada pelo CNPMS/ EMBRAPA (Centro Nacional de Pesquisas do Milho e Sorgo), com a realidade local, tanto física/ambiental como socioeconómica.

Segundo AGRA (2016), cada município tem as suas respectivas funções de ordenamento do espaço urbano, através de zoneamento, uso e ocupação do solo, dentre outras. Com isso, esses instrumentos devem conter previsões normativas variadas, desde as relacionadas às condições de acesso dos cidadãos aos direitos básicos de moradia, protecção ao meio ambiente e património natural; até aquelas que tratam dos aspectos sociais, históricos, culturais, económicos e políticos.

Segundo XAVIER DA SILVA, J. (2004), entender o ambiente, de acordo com uma visão sistêmica e com características dinâmicas, é aquela que o apresenta como um produto do intercâmbio entre factores físicos, bióticos e socioeconómicos, actuando de forma convergente na sua caracterização como fenómeno perceptível.

A vantagem desse tipo de estrutura metodológica é que a qualquer momento existe a possibilidade de actualização dos dados relativos a algum plano de informação, possibilitando grande dinâmica em relação a escala temporal.

Os estudos voltados à compreensão dos problemas decorrentes da relação sociedade-natureza no ambiente urbano buscam embasamento nas leituras que priorizam uma aproximação com a visão complexa da realidade, no anseio de identificar e compreender as inter-relações entre os factores sociais e ecológicos, locais ou regionais, que dão forma e ao mesmo tempo são formados pela dinâmica socioambiental urbana (COELHO, 2004; MENDONÇA, 2004).

Para os habitantes das áreas urbanas mais pobres, as inundações constituem uma ameaça constante. Por todo o mundo, as vidas dos pobres são marcadas pelos riscos e vulnerabilidades provocados por um clima incerto (PNUD, 2015).

Nesse sentido, verificamos o quanto as inundações são destrutivas, principalmente para as classes sociais menos favorecidas, com salários que não permitem condições para a sobrevivência. Ocorre a perda de moradias, interrupções nos transportes, problemas com saneamento básico, maior violência e agitação social, perda de bens e empregos, o que pode ter um grave efeito psicológico nas pessoas, levando, às vezes, à depressão.

11 A CONTRIBUIÇÃO COMPREENDE SEIS ETAPAS DISTINTAS, A SABER

- I – Definição das Alternativas de Planeamento;
- II – Definição dos Cenários de Descobertas;
- III – Definição da Escala das Actividade;
- IV – Qualificação e Quantificação dos Riscos e dos Impactos Ambientais;
- V – Definição das Medidas Mitigadoras Prioritárias;
- VI – Revisão da Quantificação dos Riscos e dos Impactos Ambientais considerando-se a adopção das medidas mitigadoras prioritárias.

12 METODOLOGIA DE CAMPO

Se tratando de uma contribuição para ser aplicada em áreas territorialmente seleccionadas, estima-se que informações deverão ser colectadas in loco, a partir dos instrumentos metodológicos elaborados pelos pesquisadores. As visitas de campo

possibilitam agregar as informações adquiridas nas pesquisas em bases de dados. A equipe de campo deve ser constituída de pelo menos: **3** profissionais de engenharia civil para propor e quantificar as soluções técnicas visando a mitigação dos riscos de inundações urbanas neste Município de Lichinga; **4** Geógrafos para avaliação Geomorfológico dos locais que têm sido frequentemente e gravemente afectados pelas inundações e colaborar na análise de soluções técnicas para estas zonas de risco.

13 IMPORTÂNCIA DA INCLUSÃO DA PARTICIPAÇÃO DAS COMUNIDADES VULNERÁVEIS NA GESTÃO DE RISCOS

A boa gestão de inundações pode beneficiar muito com a participação dos envolvidos. Para esse efeito, a acção de reduzir os riscos de inundações deve ser elaborado através de um processo participativo que passa por identificar as informações, experiências e métodos que diferentes autores podem fornecer e depois projectar as medidas concretas, usando a experiência e conhecimento. A gestão do risco de inundações deve ser caracterizada como participativa, compartilhada, continuada e fortemente solidária, para aplicação na comunidade, com objectivo de melhorar o ambiente e o bemestar do ser humano. Como tal, o sucesso na gestão de áreas de risco de inundações depende da selecção das medidas adequadas com base em características físicas e morfológicas das áreas afectadas, das condições económicas e sociais, políticas e do condicionamento ambiental e planeamento deste mesmo risco (Costa, et al., 2014).

14 O PROCESSO DE INUNDAÇÃO URBANA NO MUNICÍPIO DE LICHINGA

As inundações urbanas ocorrem, principalmente, pelo processo natural no qual rios e canais urbanos transbordam para o seu leito maior, devido ao aumento súbito ou gradual da vazão da água no leito menor, este tipo de evento é decorrente de processos naturais do ciclo hidrológico, sendo observado tanto nos espaços urbanos quanto nos espaços rurais, (TUCCI, 2012; 2008).

No Município de Lichinga, as cheias (enchentes) dos rios e, conseqüentemente, as inundações são causadas pelas precipitações e pelo escoamento superficial gerado pela impermeabilização do solo. As águas superficiais urbanas são conduzidas até nos cursos de água, em períodos de maior vazão, ocupam o seu leito maior ou, ainda, as planícies de inundações. No entanto, e porque a população ocupa as planícies de inundações, os problemas são frequentes e as conseqüências são desastrosas.

As chuvas com alta intensidade e curta duração produzem problemas ainda mais graves, associadas às características do relevo bem como ao uso e à ocupação do solo

urbano. O número de inundações e a amplitude dos fenómenos, além dos problemas socio-ambientais que emergem da complexa relação sociedade - natureza no espaço urbano, são aspectos observados sob a óptica da gestão dos riscos de desastres.

Para este estudo podemos afirmar que para o Município de Lichinga, os processos responsáveis para a inundação urbana são os índices de vulnerabilidade social que produzem os níveis críticos de risco de inundação, mensurados e demonstrados nesta tese. O conjunto de atributos sociais foi considerado na escala espacial dos sectores censitários urbanos, em que os processos produtores da vulnerabilidade social e os fenómenos do perigo de inundação se inter-relacionam, se integram e se manifestam no sistema ambiental urbano em Lichinga. Com base nos resultados deste estudo, destaca-se que a vulnerabilização dos sujeitos é agravada por um processo de urbanização, sobretudo nas zonas de riscos a inundação.

O crescimento do número de domicílios formais e assentamentos informais ao longo das áreas de inundação dos rios urbanos do Município de Lichinga integra o mesmo fenómeno responsável pela produção dos riscos e das vulnerabilidades e evidenciam a emergência dos problemas socioambientais identificados.

15 OS FACTORES DE RISCO DE INUNDAÇÃO NO MUNICÍPIO DE LICHINGA

As inundações em áreas urbanas são fenómenos conhecidos por provocarem um cenário de muitos prejuízos, bem como, por produzirem desalojamentos e até fatalidades, todavia, as consequências indesejáveis produzidas pelas inundações não devem ser atribuídas somente às chuvas, mas principalmente às interferências humanas no meio ambiente. Embora existam diversos estudos que tratem do tema inundações, verifica-se que cada lugar carrega suas particularidades, assim, um dos primeiros factores relacionados com as inundações no Município de Lichinga são as fortes chuvas, que muitas vezes ocorrem repentinamente.

No Município de Lichinga 8 bairros são atingidos frequentemente pelas inundações que representa um grave risco para as populações, em especial para as de baixa renda que ocupam as faixas marginais dos cursos de água. A inundação urbana se coloca como um desafio ao desenvolvimento, suas causas estão mudando e os seus impactos estão se tornando cada vez mais acelerados.

Muitos são os factores que interferem nos eventos de inundação no município de Lichinga, estes vão desde a vulnerabilidade da população, a estrutura das habitações, sistema de drenagem urbana das águas pluviais, a oferta dos recursos naturais, impactos inter-relacionados, ocupação de áreas de risco, eventos naturais e antrópicos.

16 AVALIAÇÃO DO RISCO DE INUNDAÇÃO NO MUNICÍPIO DE LICHINGA

Existe um conflito entre urbanização, desenvolvimento e ambiente, que devido à rápida expansão da mancha urbana sem infra-estrutura básica causa o aumento da exposição aos riscos e perigos ambientais, sendo as famílias instaladas em áreas vulneráveis uma das principais causas das inundações atingirem a população neste Município de Lichinga.

Segundo SILVA (2007), uma das causas das inundações é o escoamento pluvial. Os impactos produzidos nas áreas urbanas ocorrem devido a dois factores: as inundações de áreas ribeirinhas e a urbanização, os quais podem ocorrer tanto simultaneamente como separadamente. O primeiro caso, é um processo natural do ciclo hidrológico e ocorre principalmente devido a ocupação de áreas de várzea por populações de baixa renda.

De modo geral, o risco baseia-se em dois elementos fundamentais para sua definição: o perigo, que é o potencial impacto, um fenómeno ou uma actividade humana; e a vulnerabilidade, sendo esta o grau de susceptibilidade dos elementos expostos a essa fonte de perigo. O mapeamento das áreas atingidas por eventos anteriores serve para a elaboração do perigo encontrado na área de estudo pois um histórico de eventos caracteriza um maior grau de risco para área, sendo o monitoramento dos eventos de inundação importante tanto para estudos hidrológicos como para a avaliação das áreas de risco de desastres naturais relacionados a inundações no município de Lichinga.

A avaliação do risco de inundação no município de Lichinga foi elaborada a partir de dois índices básicos, a declividade do terreno e a distância para os corpos de água. Estes índices foram adquiridos a partir de dados cartográficos básicos e manipulados em ambiente SIG na escala 1:2000, sendo estes os pontos cotados e as curvas de nível. A partir destes dados foi possível criar o Modelo Digital de Elevação (MDE), do qual foi gerado um mapa de declividade do município. Os critérios utilizados na avaliação dos riscos foram hierarquizados em cinco classes conforme sua susceptibilidade a inundações. As Tabela 1 e a Tabela 2 apresentam a divisão aplicada para este estudo. As classes foram definidas baseando-se nas características físicas da área estudada, assim como em seu histórico, tendo em vista que a área urbana do município é predominantemente planáltica foi necessário definir intervalos de classes menores que em outros estudos, para assim ser mais compatível com o histórico municipal, o mesmo critério foi utilizado para as classes de distância dos corpos hídricos.

Tabela 1: Classes de risco de evento hidrológico extremo quanto as classes de declividade.

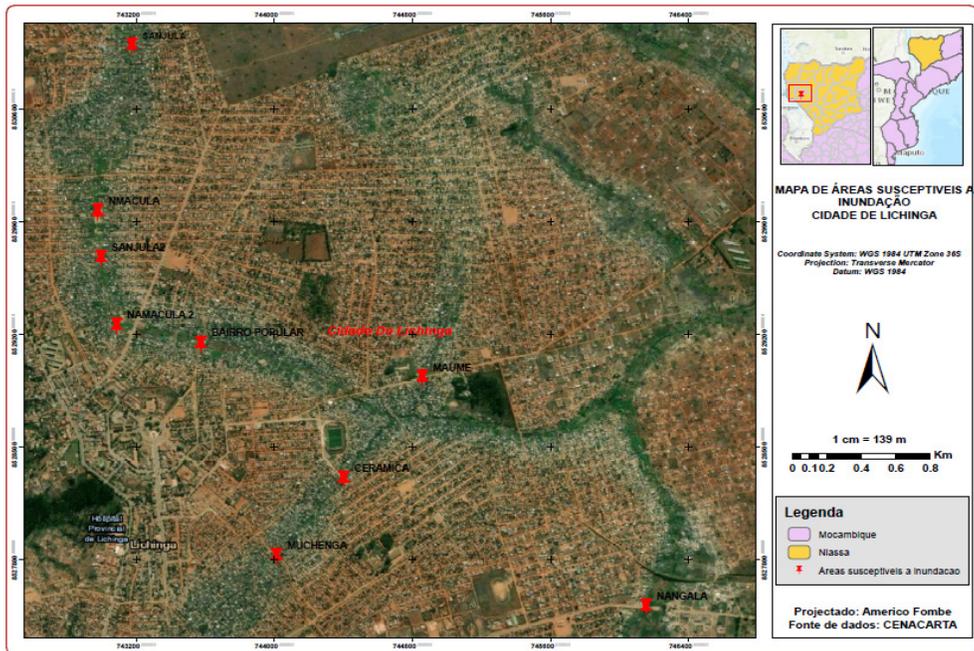
Declividade	Classe
> 30 %	Muito baixa
De 15 % a 30 %	Baixa
De 6 % a 15 %	Média
De 2 % a 6 %	Alta
< 2 %	Muito alta

Tabela 2: Classes de risco de evento hidrológico extremo quanto a distância de corpos hídricos.

Declividade	Classe
> 1000 m	Muito baixa
De 500 m a 1000 m	Baixa
De 100 m a 500 m	Média
De 50 m a 100 m	Alta
< 50 m	Muito alta

17 ÁREAS DE RISCOS DE INUNDAÇÕES

Mapa 7: Áreas de riscos de inundações no Município de Lichinga.



Observando o mapa 7 é possível perceber fragmentos da área urbana inseridos em áreas de risco, demonstrando a importância deste tipo de avaliação para a espacialização

das áreas de maior susceptibilidade a inundação, servindo assim de subsídio para acções dos órgãos competentes tanto no planeamento urbano como no auxílio em momentos de eventos extremos.

Com os critérios de classificação das classes de risco de inundação definidos nesta tese foi possível caracterizar de forma mais precisa e heterogénea a área municipal, encontrando assim áreas mais específicas onde as características físicas demonstram uma maior susceptibilidade a ocorrência de inundações, as quais apresentam grande relação com as áreas afectadas pelo evento de 2018 a 2020, por estas estarem predominantemente inseridas em zonas de classificação de perigo alto, as quais são caracterizados por pequenas declividades no terreno e por estarem próximas a corpos hídricos. As delimitações das áreas afectadas servem como medidas de subsídio para a municipalidade em programas de gestão e planeamento,

Porém, é necessária haver uma base de dados para todos os eventos que atingirem o município, para assim poder haver uma continuidade nos estudos gerando assim planos de prevenção a desastres naturais. Embora não seja possível evitar este tipo de evento, pode-se por meio de medidas preventivas minimizar seus efeitos para que não se tornem grandes catástrofes. Evitar um desastre natural é mais económico do que reconstruir as zonas afectadas.

18 CARACTERIZAÇÃO SOCIOECONÓMICA DO MUNICÍPIO DE LICHINGA

A Influência económica é bastante reduzida comparada com outras capitais provinciais. É uma cidade dependente, sobretudo da cidade de Nampula, como terminal do Corredor de Nacala. Lichinga é uma cidade com características económicas eminentemente agrícolas. Possui pequenas indústrias de processamento primário de produtos agrícolas. A rede de infra-estruturas é ainda incipiente.

O marco de expansão urbana na cidade de Lichinga na década de 90 foi o aparecimento do bairro de Namacula e a intensificação do processo de ocupação da planície de inundação dos rios Muchenga e Namacula. À semelhança dos factores de motivação que levaram à expansão desordenada dos bairros Sanjala, Popular, Muchenga e Cerâmica, na década anterior, de 2000 para cá, surge o bairro conhecido por “Nangala” e a expansão dos bairros existentes, através da ocupação intensiva de áreas inundáveis da planície aluvial dos rios Muchenga, Namacula e Lucheringo, e ainda a ocupação de algumas áreas com vertentes declivosas como é o caso da expansão do bairro de Nzinjé em direcção ao rio com o mesmo nome.

Foto 1: Construções nas áreas inundáveis.



Devido à informalidade que sempre caracterizou o processo de aparecimento de novos aglomerados populacionais no Município de Lichinga a maioria das famílias nelas instaladas vive desprovida de grande parte dos serviços básicos urbanos como sejam o acesso a água e saneamento seguros. Para citar alguns exemplos, a principal fonte de água para o consumo das famílias é o poço a céu aberto e a latrina tradicional não melhorada é o principal tipo de serviço sanitário. Os resíduos sólidos (lixo) são depositados nas valas de drenagem abertas pelos próprios moradores para permitir o escoamento das águas pluviais.

A localização destes aglomerados em áreas inundáveis, onde as famílias vivem privadas de serviços de água e saneamento seguros, representam os principais perigos ou ameaças com que as populações se deparam e que podem ser resumidos em:

- (i) Destruição de infra-estruturas (casas, latrinas e poços) devido ao tipo e qualidade do material e técnicas usadas na edificação das mesmas (por exemplo: o adobe e o capim);
- (ii) O surto e a frequência de doenças de origem hídrica resultante do consumo de água dos poços a céu aberto e;
- (iii) A eclosão da malária pela proliferação dos focos de reprodução e propagação do mosquito, como os casos de águas estagnadas nas valas de drenagem e águas negras das latrinas tradicionais não melhoradas.

Actualmente, podem ser distinguidos no Município de Lichinga quatro tipos de usos do solo principais, designadamente: (1) cultivo agrícola e áreas arbustivas, (2) a floresta e as plantações florestais, (3) as áreas húmidas e (4) o uso habitacional.

A vulnerabilidade da população à inundação, principalmente nos centros urbanos, deve-se em grande medida a factores como o crescimento acelerado da população urbana, o estado de pobreza de grande parte da população de Lichinga, a carência e distribuição irregular de infra-estruturas e serviços sociais básicos (habitacionais, rodoviárias, abastecimento de água e saneamento básico). São no geral estes os factores responsáveis pela ocupação informal e desordenada de áreas potencialmente inadequadas, principalmente para fins habitacionais, como as planícies de inundações e encostas declivosas susceptíveis a movimentos de terras. O comportamento climático da região (planalto de Lichinga) e a estrutura geomorfológica são factores chaves para a ocorrência de inundações.

O clima da região é caracterizado por chuvas intensas, prolongadas e concentradas no tempo (com 70% da pluviosidade total anual concentrada nos meses de Dezembro a Fevereiro) e a estrutura geomorfológica caracterizada pela predominância de interflúvios, encostas superiores e vales é, em grande medida, um dos determinantes para que a superfície da cidade tenha uma rede de drenagem densa e que os cursos de água como Namacula, Muchenga e Lucheringo atinjam com alguma frequência caudais excepcionais e consequentes ocorrências de cheias e inundações.

Devido ainda à sua estrutura geomorfológica, como a existência de uma extensa área topograficamente deprimida que circunda o centro da cidade, a inundação na cidade é resultado da combinação entre os processos de transbordo do volume das águas dos rios nela localizados (Namacula, Muchenga e Lucheringo), da subida do lençol freático e da impermeabilização das superfícies dos solos decorrentes das actividades humanas (construções desordenadas).

A localização do centro da cidade junto ou na proximidade das referidas planícies é de longe o principal factor da sua conversão em assentamentos humano, pois aí estão

localizadas grande parte das infra-estruturas, equipamentos e serviços sociais. O uso ainda inadequado e desordenado do solo urbano, caracterizado pela ocupação de planícies de inundação para fins habitacionais, e as práticas inadequadas de saneamento básico, como o depósito de resíduos sólidos nos cursos de água, constituem factores de destaque para o agravamento e a ampliação da inundação na cidade.

A localização de assentamentos humanos em zonas de susceptibilidade à ocorrência de inundação, a qualidade do material básico de construção das habitações (adobe e capim), o uso de poço a céu aberto, como fonte básica de água para o consumo, e a latrina tradicional não melhorada, como tipo de serviço sanitário básico na habitação, constituem aspectos ou elementos básicos que elevam o grau de exposição dos elementos essenciais (habitação e saúde humana) das famílias ao risco de inundação.

Pode-se dizer que, ao nível do Município de Lichinga, a susceptibilidade associa-se sobretudo ao clima e à Geomorfológico; a vulnerabilidade (grau de perda), a formas inadequadas de ocupação e de uso do solo urbano e as estruturas sócio-demográfica e económicas das famílias determinam “baixa” resiliência (capacidade de antecipar, actuar, resistir e recuperar).

19 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Contribuição para o Zoneamento do Risco de Inundações Urbanas no Município de Lichinga, representa um desafio complexo, pois não se trata apenas de preservar recursos naturais ou utilizar medidas estruturais, mas também assegurar condições de vida digna à população, juntamente com o estímulo ao processo de desenvolvimento, ou seja, é preciso pensar na gestão do risco de inundação no meio ambiente urbano sob o prisma de uma estratégia sustentável.

BIBLIOGRAFIA

COELHO, A. M. (2004). *Fatores sociais e ecológicos na dinâmica urbana. Revista Brasileira de Urbanismo.*

Costa, et al. (2014). *Gestão de áreas de risco de inundações: análise de medidas com base em características físicas e socioambientais. Revista Geociências.*

Conselho Municipal da Cidade de Lichinga, 2014.

Instituto Nacional de Estatística 2017.

MENDONÇA, F. (2004). *Sistema Ambiental Urbano: uma abordagem dos problemas socioambientais da cidade.* In: MENDONÇA, F. (Org.). *Impactos socioambientais urbanos.* Curitiba: Editora da UFPR.

Ministério para a Coordenação da Acção Ambiental, 2002.

Muchangos, L. (1995). *Impactos socioambientais da urbanização em Moçambique: Estudo de caso em Maputo*. Maputo: Universidade Eduardo Mondlane, Portal de Monografias da Universidade Eduardo Mondlane. Acesso em 8 de outubro de 2024.

Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD). (2015). *Relatório sobre Desenvolvimento Humano e Mudanças Climáticas*. Nova Iorque: PNUD.

Ramalho Filho, A., & Beek, K. J. (1995). *Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras* (3ª ed.). Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS.

Silva, L., & Zaidam, F. (2004). *Sustentabilidade e planejamento urbano: A urbanização e seus impactos ambientais*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil.

Tucci, C. E. M. (2002). *Gestão da drenagem urbana*. Porto Alegre: Editora da UFRGS.

CAPÍTULO 4

PALEOCANAIS NA PLATAFORMA CONTINENTAL INTERNA DO RIO GRANDE: EVIDÊNCIAS DE VARIAÇÕES EUSTÁTICAS DURANTE O QUATERNÁRIO

Data de submissão: 26/10/2024

Data de aceite: 11/11/2024

Laurício Corrêa Terra

Universidade de Aveiro, Portugal

<http://lattes.cnpq.br/2396235489222171>

RESUMO: Este estudo investiga a ocorrência de paleocanais na plataforma continental interna do Rio Grande, uma região chave para a compreensão das variações eustáticas durante o Quaternário. Dados sísmicos de alta resolução (3,5 kHz) revelaram a presença de antigos canais fluviais que cortam depósitos transgressivos, indicando a importância das oscilações do nível do mar na configuração e sedimentação da plataforma. Esses paleocanais são evidências diretas de fases regressivas e transgressivas, nas quais os rios esculpiram o relevo durante os períodos de regressão marinha, posteriormente preenchidos por sedimentos finos durante as transgressões. O estudo conclui que as variações eustáticas controlaram a morfologia e a dinâmica sedimentar da região, criando um registro sedimentar valioso para a reconstrução paleogeográfica do Quaternário. Estes achados fornecem novos insights sobre os processos sedimentares e paleoclimáticos que influenciaram a evolução da plataforma continental interna de Rio Grande.

PALAVRAS-CHAVE: Paleocanais. Variações Eustáticas. Quaternário. Sísmica de Alta Resolução.

PALEOCHANNELS ON THE INNER CONTINENTAL SHELF OF RIO GRANDE: EVIDENCE OF EUSTATIC VARIATIONS DURING THE QUATERNARY

ABSTRACT: This study investigates the occurrence of paleochannels on the inner continental shelf of Rio Grande, a key area for understanding eustatic variations during the Quaternary. High-resolution seismic data (3.5 kHz) revealed the presence of ancient fluvial channels that cut through transgressive deposits, highlighting the significance of sea-level oscillations in the shaping and sedimentation of the shelf. These paleochannels are direct evidence of regressive and transgressive phases, where rivers carved the relief during marine regressions, later filled with fine sediments during transgressions. The study concludes that eustatic variations controlled the morphology and sedimentary dynamics of the region, creating a valuable sedimentary record for Quaternary paleogeographic reconstruction. These findings offer new insights into the sedimentary and paleoclimatic processes that influenced the evolution of the inner continental shelf of Rio Grande.

KEYWORDS: Paleochannels. Eustatic Variations. Quaternary. High Resolution Seismic.

1 INTRODUÇÃO

O estudo dos paleocanais em plataformas continentais tem se mostrado crucial para a compreensão da evolução geológica das margens continentais e das variações eustáticas que ocorreram ao longo do Quaternário. Esses antigos sistemas de drenagem, agora preservados nos sedimentos, são registros valiosos das oscilações do nível do mar, evidenciando períodos de exposição e submersão das plataformas (Corrêa, 1996). A plataforma continental interna do Rio Grande, no sul do Brasil, é uma área de especial interesse devido ao seu contínuo registro sedimentar, que documenta as dinâmicas costeiras influenciadas por flutuações eustáticas, tornando-se um laboratório natural para o estudo desses fenômenos.

Durante o Quaternário, as oscilações do nível do mar tiveram um impacto profundo na morfologia costeira, gerando ciclos de regressão e transgressão marinha que influenciaram diretamente a deposição de sedimentos em ambientes fluviais e marinhos. Essas oscilações, registradas na forma de paleocanais que dissecam a plataforma continental interna, preservam a estrutura de antigos sistemas de drenagem que operavam durante fases de nível do mar mais baixo (Weschenfelder et al., 2006). Além de serem importantes depósitos sedimentares, esses canais fornecem uma visão detalhada dos processos hidrodinâmicos e sedimentares ocorridos em resposta a mudanças ambientais globais.

Os paleocanais são frequentemente associados a eventos de regressão, nos quais os rios esculpiram profundas feições na plataforma exposta, que posteriormente foram preenchidas por sedimentos transgressivos à medida que o nível do mar subia (Zembruski, 1979). Esses processos são particularmente relevantes no sul do Brasil, onde as oscilações eustáticas moldaram significativamente a dinâmica costeira e fluvial (Toldo et al., 2000). Estudos recentes que empregam dados de sísmica de reflexão de alta resolução identificaram sistemas de paleodrenagem que atravessam a planície costeira média e norte do estado do Rio Grande do Sul, contribuindo para o entendimento das interações entre a morfodinâmica da costa e as variações eustáticas (Weschenfelder et al., 2005, 2008, 2014).

A utilização de perfis sísmicos de alta resolução, como os de 3,5 kHz, possibilitou a identificação pioneira de sistemas de drenagem enterrados, além de acumulações de gás raso, principalmente na forma de bolsões e gás disseminado, em áreas como a Lagoa dos Patos (Weschenfelder et al., 2006). A sedimentação nas plataformas continentais internas registra não apenas a morfodinâmica de linhas de costa antigas, mas também a relação entre as mudanças eustáticas e a evolução das paisagens

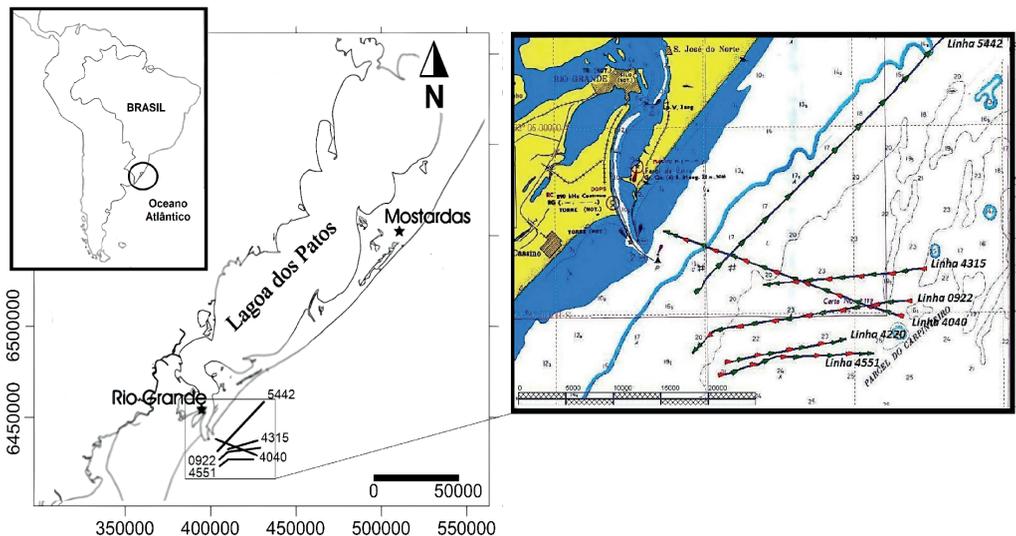
submersas, como evidenciado em estudos globais que exploram a dinâmica litorânea e as antigas feições topográficas (Roy et al., 1994; Peterson et al., 2016; Lee et al., 2017 apud Cooper et al., 2018).

Neste estudo, ao analisar registros sísmicos detalhados da plataforma continental interna do Rio Grande, buscamos compreender como as antigas redes fluviais esculpiram a geologia regional e como as variações eustáticas influenciaram a sedimentação e a geomorfologia dessa área. Os resultados obtidos oferecem uma perspectiva sobre os mecanismos sedimentares e as interações entre processos fluviais e marinhos ao longo de um período marcado por intensas mudanças ambientais.

2 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada na plataforma continental interna do Rio Grande abrangendo um total de seis perfis sísmicos (Figura 1). Esta região possui uma extensão considerável, com uma plataforma que atinge até 125 km de largura e é caracterizada por uma topografia suave e gradiente de baixa declividade, com a presença de *sand waves*, além de canais associados com ambientes fluviais antigos. É considerada bastante extensa comparada a outras regiões do país. Apresenta um relevo suave, sem grandes variações topográficas e com declividade média entre 1,3 e 1,4 m/km. Em geral, os contornos batimétricos acompanham a morfologia da costa, não apresentando formas topográficas acrescionais ou erosionais de grande amplitude regional (Zembruscki, 1979).

Figura 1 – Mapa de localização dos perfis sísmicos coletados na plataforma interna o Rio Grande durante cruzeiros oceanográficos a bordo do Navio Oceanográfico Atlântico Sul, operado pela Universidade Federal do Rio Grande (FURG).



Receptora de pequenas contribuições de sedimentos terrígenos, apresenta-se recoberta por sedimentos depositados em ambiente pretérito, estando em desequilíbrio com as condições atuais, sendo, portanto *reliíquias*, além daqueles que estão sendo retrabalhados pela dinâmica atual.

Segundo Calliari (1984), a plataforma apresenta-se mais ampla a partir Mostardas em direção ao Chuí (setor meridional) onde se caracteriza por inúmeros vales pertencentes à paleodrenagens fluviais e por inúmeros bancos arenosos. Já o setor setentrional caracteriza-se pela homogeneidade morfológica.

3 METODOLOGIA

A aquisição dos dados sísmicos foi realizada durante cruzeiros oceanográficos a bordo do Navio Oceanográfico *Atlântico Sul*, operado pela Universidade Federal do Rio Grande (FURG). Foram obtidos perfis sísmicos de alta resolução utilizando o Chirp Sub-Bottom Profiler, operando a 3,5 kHz, com o objetivo de mapear a subsuperfície sedimentar e identificar a presença de paleocanais. O sistema utilizado foi o Bathy 2010P™, da SyQwest, Inc., que permitiu a captura detalhada de anomalias acústicas associadas aos canais fluviais pretéritos.

Os dados sísmicos foram processados utilizando o software SonarWiz, onde foram aplicados filtros de ganho e atenuação para reduzir os ruídos gerados pela embarcação e pela coluna d'água. Este processamento permitiu uma maior definição dos refletores sedimentares e das estruturas internas dos paleocanais. A velocidade de propagação do som nos sedimentos foi ajustada para 1.650 m/s, conforme recomendado por Macedo et al. (2009), para otimizar a resolução vertical dos perfis e garantir a precisão nas estimativas de profundidade.

A interpretação dos dados sísmicos foi focada na identificação de estruturas paleofluviais, observando-se as características geomorfológicas dos paleocanais, suas larguras e profundidades, e a disposição dos sedimentos que os preenchem. O mapeamento foi realizado em várias seções da plataforma continental interna, com destaque para os perfis que apresentavam evidências claras de redes de drenagem pretéritas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

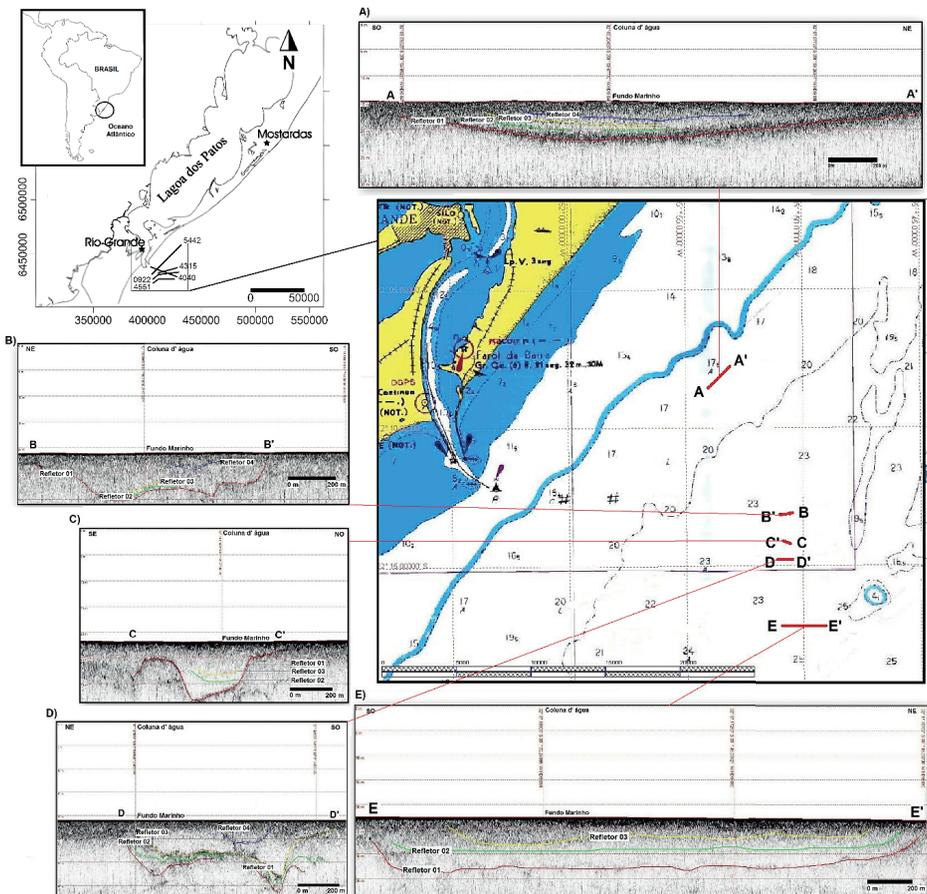
Os perfis sísmicos de alta resolução adquiridos ao longo da plataforma continental interna de Rio Grande revelam uma complexa rede de paleocanais soterrados, formados durante o Quaternário. Esses canais, escavados em períodos de regressão marinha, resultam de variações no nível do mar, que, ao cair significativamente, permitiram o desenvolvimento

de redes de drenagem. Posteriormente, durante os períodos de transgressão, com a elevação do nível do mar, esses canais foram preenchidos por sedimentos marinhos.

Os dados sísmicos demonstram uma clara sequência de eventos de erosão fluvial, seguidos por processos de deposição sedimentar. As estruturas erosivas são bem delineadas nos perfis e indicam a presença de processos ativos de escavação e posterior preenchimento com sedimentos marinhos e fluviais. Para a interpretação dos refletores acústicos, foram considerados atributos sísmicos como amplitude, continuidade lateral, frequência do sinal, morfologia, geometria e disposição das camadas sedimentares. Esses atributos foram fundamentais para identificar e mapear os limites de topo e base das camadas sedimentares, conforme Cooke et al. (2005).

4.1 IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS PALEOCANAIS

Figura 2 – Mapa de localização e perfis sísmicos com paleocanais coletados na plataforma interna o Rio Grande durante cruzeiros oceanográficos a bordo do Navio Oceanográfico Atlântico Sul, operado pela Universidade Federal do Rio Grande (FURG).



Paleocanal A – A’: Localizado entre as coordenadas $32^{\circ} 08,5249'S / 51^{\circ} 54,0771'W$ e $32^{\circ} 07,7496'S / 51^{\circ} 53,1027'W$, este paleocanal tem uma largura de 2.097,9 metros. O Refletor 01 está a uma profundidade de 7,4 metros. A morfologia assimétrica do canal sugere diferentes condições de erosão nas margens, com margens íngremes indicando processos erosivos mais intensos. Três refletores internos visíveis a 5,88 metros, 4,85 metros e 1,80 metros indicam múltiplos eventos deposicionais fluviais, provavelmente do Pleistoceno. A continuidade lateral dos refletores evidencia um processo de sedimentação relativamente estável, embora com variações temporais (Figura 2).

Paleocanal B – B’: Entre as coordenadas $32^{\circ} 13,0813'S / 51^{\circ} 50,4130'W$ e $32^{\circ} 13,1179'S / 51^{\circ} 51,0408'W$, este paleocanal tem 982 metros de largura. O Refletor 01, a 8,03 metros de profundidade, apresenta boa continuidade lateral, com três refletores internos (7,32 metros, 6,65 metros e 2,4 metros) sugerindo múltiplas fases deposicionais. A geometria simétrica das margens indica uma erosão mais uniforme, e a continuidade lateral dos refletores sugere uma deposição estável ao longo do tempo (Figura 2).

Paleocanal C – C’: Localizado entre $32^{\circ} 14,1639'S / 51^{\circ} 50,6122'W$ e $32^{\circ} 14,0934'S / 51^{\circ} 50,8616'W$, o paleocanal tem 412,70 metros de largura. O Refletor 01, a 11 metros de profundidade, indica uma erosão significativa, sugerindo um paleocanal de alta capacidade de transporte de sedimentos. Dois refletores internos foram identificados a 6,52 metros e 5,51 metros de profundidade, e apresentam boa continuidade lateral, sugerindo um regime deposicional estável.

Paleocanal D – D’: Com 1.038 metros de largura, este paleocanal está localizado entre $32^{\circ} 14,7837'S / 51^{\circ} 50,4976'W$ e $32^{\circ} 14,8622'S / 51^{\circ} 51,1585'W$. O Refletor 01 se encontra a 14,18 metros de profundidade, com três refletores internos a 12,72 metros, 10,70 metros e 4,38 metros, indicando múltiplas fases de preenchimento. A orientação paralela à linha de costa sugere uma drenagem influenciada por processos costeiros (Figura 2).

Paleocanal E – E’: O maior dos paleocanais analisados, com 2.647 metros de largura, está entre $32^{\circ} 17,2072'S / 51^{\circ} 50,7799'W$ e $32^{\circ} 17,1583'S / 51^{\circ} 49,0943'W$. O Refletor 01 se encontra a 9,60 metros de profundidade, com dois refletores internos visíveis a 6,01 metros e 4,84 metros. A geometria ampla e pouco profunda indica um sistema de baixa energia, possivelmente relacionado a um ambiente costeiro de baixa maré ou a um sistema lagunar (Figura 2).

Os resultados sísmicos indicam variações geomorfológicas significativas entre os paleocanais, refletindo diferentes histórias de erosão e deposição sedimentar. A identificação de refletores internos sugere múltiplas fases deposicionais, influenciadas por variações eustáticas e flutuações climáticas durante o Quaternário. As camadas de

sedimentos mais arenosos, intercaladas por camadas mais finas, indicam mudanças nos regimes deposicionais ao longo do tempo.

Esses resultados corroboram estudos anteriores, sugerindo que a plataforma continental de Rio Grande esteve exposta durante períodos de regressão, e os paleocanais mapeados fazem parte de uma antiga rede de drenagem, como a dos rios Camaquã e Jacuí (Weschenfelder et al., 2014). A fase transgressiva que seguiu a última glaciação foi crucial para o soterramento e preenchimento desses paleocanais com sedimentos marinhos.

A presença de múltiplas gerações de paleocanais revela que a plataforma continental interna de Rio Grande foi submetida a repetidos ciclos de exposição e submersão. Comparações com estudos internacionais mostram que esse fenômeno é comum em plataformas costeiras, com paleocanais afogados e preservados por sedimentos transgressivos (Nordfjord et al., 2005). Além disso, a presença de gás associado a esses sistemas de drenagem, conforme descrito em estudos anteriores, sugere a possibilidade de relevância econômica desses depósitos, especialmente no que diz respeito à exploração de hidrocarbonetos.

O estudo dos paleocanais na plataforma continental interna de Rio Grande contribui para o entendimento dos processos geomorfológicos e sedimentares que moldaram a região, fornecendo insights sobre as variações eustáticas e deposicionais durante o Quaternário.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Quaternário foi marcado por flutuações significativas no nível do mar, que resultaram em fases alternadas de exposição e submersão da plataforma continental rasa no Rio Grande do Sul, afetando diretamente a configuração subsuperficial e a deposição de sedimentos. Durante os períodos de regressão, particularmente durante a última Regressão Pleistocênica, formou-se uma extensa planície costeira caracterizada pela presença de complexas redes de drenagem fluvial. Com a subsequente Transgressão Holocênica, essas redes fluviais foram gradualmente retrabalhadas e afogadas, o que resultou na modificação da morfologia costeira e na preservação de canais fluviais soterrados, que moldaram o atual cenário da plataforma.

A análise de dados sísmicos de alta frequência (3,5 kHz) permitiu a identificação de diversos elementos arquiteturais do substrato da plataforma continental interna, evidenciando descontinuidades sísmicas marcantes que delimitam os contornos de paleocanais pleistocênicos e holocênicos. Esses canais estão associados a processos de sedimentação controlados por variações eustáticas, e as feições identificadas sugerem o

retrabalhamento contínuo desses depósitos ao longo do Holoceno. Além disso, a presença de possíveis acumulações de gás nos sedimentos indica que há matéria orgânica em degradação, o que pode estar relacionado a ambientes paleolagunares ou estuarinos.

Na área de estudo, foi observada uma distribuição densa de paleocanais concentrados na região norte, particularmente na área do Estreito. No sul, a malha de perfis sísmicos apresentou-se mais espaçada, com menor quantidade de registros de paleocanais, sugerindo uma diferenciação nos padrões de drenagem ao longo da plataforma. As posições de alguns desses registros indicam a possibilidade de que representem o antigo leito do rio Camaquã, hipótese que, embora plausível, requer investigações adicionais. Estudos comparativos envolvendo análises de minerais pesados na região seriam necessários para confirmar essa correlação.

A presença de cortinas de gás em perfis ao sul da área de estudo reforça a hipótese de deposição em ambientes paleolagunares, sugerindo condições propícias para a acumulação de matéria orgânica e subsequente geração de gás. Isso pode representar um potencial geológico relevante para futuras investigações sobre o comportamento dos depósitos de gás em sedimentos transgressivos.

Este trabalho corrobora as investigações anteriores na área, confirmando a presença de uma extensa rede de paleodrenagens que atravessa a plataforma continental interna. Os resultados sugerem que a atual configuração da plataforma rasa do Rio Grande do Sul reflete a herança de um ambiente emerso no passado, esculpido por uma complexa rede fluvial e lagunar. Esses achados contribuem para o entendimento da evolução paleogeográfica da região e reforçam a importância dos paleocanais como registros chave das variações eustáticas do Quaternário.

6 AGRADECIMENTOS

Expresso minha profunda gratidão ao Professor Gilberto Griep (in memoriam) e ao Professor Dr. Lauro Calliari (in memoriam) pela valiosa orientação científica e pela generosa disponibilização de dados, que foram essenciais para o desenvolvimento desta pesquisa. Suas contribuições e seu legado acadêmico permanecerão como inspiração inestimável neste trabalho e em minha trajetória.

REFERÊNCIAS

CALLIARI, L. J. **A plataforma continental do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: UFRGS, 1984.

COOKE, R.; COLLINS, M.; WILLIAMS, C. **Sedimentary structures and environmental indicators in fluvial systems**. *Geomorphology*, v. 62, n. 2, p. 45-62, 2005.

CORRÊA, I. C. S. **Les variations eustatiques au Quaternaire et la géomorphologie de la plateforme continentale sud-brésilienne.** *Geologia Costeira e Sedimentar*, v. 15, n. 3, p. 97-112, 1996.

LEE, J. S.; COOPER, A. G.; SMITH, B. L. **Sedimentary responses to Late Quaternary sea-level changes on continental shelves: a synthesis.** In: COOPER, A. G.; SMITH, B. L. (Eds.). *Marine Geology*. Elsevier, 2018. Cap. 5, p. 243-268.

MACEDO, J. et al. **Geophysical profiling in sedimentary environments.** *Journal of Marine Geology*, v. 50, n. 1, p. 21-32, 2009.

NORDFJORD, S.; GREGORY, J.; PARKER, S. **Submerged paleochannels as evidence of sea-level fluctuations.** *Continental Shelf Research*, v. 25, n. 7, p. 956-972, 2005.

PETERSON, J.; SANDERSON, P.; MARKS, D. **Fluvial geomorphology and sedimentary dynamics.** *Fluvial Systems*, v. 12, p. 76-88, 2016.

ROY, P. et al. **Evolution of coastal systems in response to eustatic changes.** *Coastal Geology*, v. 13, n. 4, p. 181-204, 1994.

TOLDO, E. E. et al. **Coastal dynamics and sedimentology of the Brazilian shelf.** *Marine and Coastal Geology*, v. 8, p. 112-130, 2000.

WESCHENFELDER, J.; SCHMIDT, V.; TOLDO, E. E. **High-resolution seismic stratigraphy of southern Brazilian continental shelf.** *Brazilian Journal of Geology*, v. 35, n. 3, p. 405-416, 2005.

WESCHENFELDER, J.; SCHMIDT, V.; TOLDO, E. E. **Paleodrainage and sedimentary processes on the inner shelf of Rio Grande do Sul.** *Marine Geology*, v. 7, n. 2, p. 75-88, 2006.

WESCHENFELDER, J.; SCHMIDT, V.; TOLDO, E. E. **Quaternary eustatic influences on sedimentation patterns.** *Quaternary Science Journal*, v. 42, p. 34-47, 2008.

WESCHENFELDER, J.; SCHMIDT, V.; TOLDO, E. E. **Submerged paleochannels and sedimentary evolution of southern Brazil.** *Journal of Quaternary Research*, v. 60, p. 12-25, 2014.

ZEMBRUSCKI, S. G. **As características geomorfológicas da plataforma continental brasileira.** Rio de Janeiro: IBGE, 1979.

CAPÍTULO 5

AGRICULTURAL LAND CONSOLIDATION (RUSSIAN CASE STUDY)

Data de submissão: 24/09/2024

Data de aceite: 11/10/2024

Alexander Sagaydak
State University of Land
Use Planning, Professor
Director of Department of Agricultural
Economics and Farm Management
Moscow, Russia
<https://orcid.org/0000-0002-6316-6134>

Anna Sagaydak
State University of Land Use Planning
Associate Professor of Department of
Agricultural Economics and
Farm Management
Moscow, Russia
<https://orcid.org/0000-0003-4389-8570>

ABSTRACT: The development of agricultural land consolidation in Russia is featured by the development of agricultural holdings and the increasing size of private farms. In the Republic of Kalmykia, there is a unique trend, which is in the increase in the number of private farms and their average size. In that sense, the development of the agricultural land market

and rent regulation are very important for the stimulation of agricultural land consolidation.

KEYWORDS: Agricultural land consolidation. Russia. Republic of Kalmykia. Rent regulation. Land market.

CONSOLIDAÇÃO DE TERRAS AGRÍCOLAS (ESTUDO DE CASO RUSSO)

RESUMO: O desenvolvimento da consolidação de terras agrícolas na Rússia é caracterizado pelo desenvolvimento de propriedades agrícolas e pelo aumento do tamanho de fazendas privadas. Na República da Calmúquia, há uma tendência única, que é o aumento do número de fazendas privadas e seu tamanho médio. Nesse sentido, o desenvolvimento do mercado de terras agrícolas e a regulamentação de aluguel são muito importantes para o estímulo à consolidação de terras agrícolas.

PALAVRAS-CHAVE: Consolidação de terras agrícolas. Rússia. República da Calmúquia. Regulamentação de aluguel. Mercado de terras.

1 INTRODUCTION

Agricultural land consolidation is a merging, enlargement, eliminating of mosaic land ownership and improvement of configuration as well as optimization of the size of land plots.

The specific objectives of agricultural land consolidation are the following:

- increasing the efficiency of agricultural production;
- providing sustainable development of the agrarian sector;
- rational use of land, labor, and capital in agriculture;
- optimization of agricultural production structures both in territorial and production aspects;
- increasing the competitiveness of agricultural producers in domestic as well as foreign markets;
- environmental protection;
- development of production as well as social infrastructure in agriculture.

Agricultural land consolidation should be carried out based on the following principles:

- voluntariness;
- openness and transparency;
- financial and economic feasibility;
- taking into account the interests of the population groups involved including women and youth as well as indigenous people;
- step by step implementation;
- consideration of local conditions;
- state and NGO support.

In theory, agricultural land consolidation can be carried out as compulsory land consolidation and voluntary land consolidation. In that sense, the development of the agricultural land market is very important for the stimulation of agricultural land consolidation.

2 METHODOLOGY

The methodology includes the study of theoretical foundations and the development of practical recommendations for improving the consolidation of agricultural land in Russia.

At the same time, using statistical methods, as well as monographic surveys, trends in the development of agricultural land consolidation at both the federal and regional levels were identified, which are:

- the concentration of land ownership by agro-industrial holdings;
- an increase in the average size of private farms while reducing their number.

But unique trends have been identified in Kalmykia in increasing:

- the area of agricultural land;
- the number and average size of private farms.

3 RESULTS

The present stage of the development of agricultural land consolidation in Russia is featured by the development of agricultural holdings and the increasing size of private farms.

The state and municipal-owned land amounted to 1,579.4 m.ha, or 92.2 %, private land -112.1 M ha, or 6.6 % and land owned by legal entities – 21.0 M ha, or 1.2 % of the total Russia's territory in 2018 [3].

The size and the share of the state and municipal-owned land in the total land of Russia were not changed in 2018 compared to 2017.

The private land area decreased by .8 M ha in 2018 compared to 2017 from 112.9 M ha to 112.1 M ha, or by .7 % [3]. The share of private land in the total land of Russia was not changed in 2018 compared to 2017. At the same time, the area of land owned by legal entities increased by .8 M ha in 2018 compared to 2017 from 20.2 M ha to 21.0 M ha, or by 4.0 % [3].

The share of land owned by legal entities in the total land of Russia was not changed in 2018 compared to 2017.

The state and municipal-owned agricultural land amounted to 254.8 M ha, or 66.6 %, private land - 107.6 M ha, or 28.2 % and land owned by legal entities – 20.0 M ha, or 5.2 % of the total Russia's agricultural land in 2018 [3].

Thus, the private agricultural land area decreased by .9 M ha in 2018 compared to 2017 from 108.5 M ha to 107.6 M ha, or by .8 %.

At the same time, the area of agricultural land owned by legal entities increased by .8 M ha in 2018 compared to 2017 from 19.2 M ha to 20.0 M ha, or by 4.2 % [3].

Moreover, the state and municipal-owned agricultural land area decreased by .6 M ha in 2018 compared to 2017 from 255.4 M ha to 254.8 M ha, or by .2 % [3]. The share of the state and municipal-owned agricultural land in 2018 compared to 2017 decreased by .1 p.p. from 66.7 % to 66.6 % in the total agricultural land [3].

The share of agricultural land owned by legal entities in 2018 compared to 2017 increased by .2 p.p. from 5.0% to 5.2% in the total agricultural land [3].

However, the share of the private owned agricultural land in 2018 compared to 2017 decreased by .1 p.p. from 28.3 % to 28.2 % in the total agricultural land [3].

Thus, at the federal level, there is a trend of the absorption of private land by legal entities. This, in particular, is also evident in the fact that a dominant role in the Russia's agricultural land use has played joint-stock companies as well as production coops.

The share of joint-stock companies and partnerships in the total area of agricultural land use of parastatals compared to 2017 increased by .7 p.p. from 53.3% to 54.0% in 2018.

Compared to 2017 the share of joint-stock companies and partnerships in cropland of parastatals increased by .8 p.p. from 58.6% to 59.4% in 2018 [3].

At the same time, the share of production coops in the total area of agricultural land use of parastatals compared to 2017 decreased by .5 p.p. from 35.6% to 35.1% in 2018. Compared to 2017 the share of production coops in cropland of parastatals decreased by .7 p.p. from 31.7% to 31.0% in 2018 [3].

Thus, there is a trend of decreasing land use of production coops and increasing land use of joint-stock companies and partnerships, which also indicates further development of the agricultural land consolidation by large and medium agricultural enterprises.

The average size of agricultural holding amounted to 608.2 K ha in 2020. Compared to 2019 it increased by 5.8 % in 2020. It varied from 380 K ha to 1,047 K ha in 2020 [1].

In 2018 the number of private farms decreased by 7.6 % compared to 1995. However, the average size of agricultural land occupied by the private farm has been increased due to land consolidation. It was estimated at 75.2 ha in 2018. Thus, it increased by 75.3 % compared to 1995 [3].

The development of agricultural land consolidation in Russia is mostly dependent on regional land policies.

In Kalmykia, we can observe a unique trend, which is in the increase in the number of private farms and in the increase in their average size. In 2019, there were 3,042 private farms in the region [4].

The number of private farms in Kalmykia increased in 2019 compared to 1992 by 10.4 times. The land area occupied by private farms in the region increased in 2019 compared to 1992 by 19.1 times [4].

The average size of the private farm amounted to 1,056 ha in Kalmykia in 2019. It increased in 2019 compared to 1992 by 1.8 times due to land consolidation based on renting and buying of agricultural land shares [4].

It is significantly different from the average for the federal level, where an increase in the area mentioned above farms is accompanied by a reduction in their number.

Here we can also observe another unique trend of increasing area of agricultural land in 2010-2019. The total area of agricultural increased in 2019 compared to 2010 by 52.1 K ha, or by .8% from 6,885.2 K ha to 6,937.3 K ha [4].

To encourage land consolidation, it is necessary to develop the agricultural land market based on land auctions. In turn, the market price of land is the basis for agricultural land taxation and mortgage transactions.

Due to it, the starting agricultural land market auction price model (SALAPM) [2] has been developed. In general, we can treat the land market auction price as a ratio between agricultural land rent and interest rate adjusted for income and agricultural land taxation as well as the inflation rate.

In this sense, it is very important to determine land tax and mortgage value based on agricultural land market value. The SALAPM looks like:

$$V_a = [R_0(1+g) (1-t)] / \{ [k(1-at)-g] (1+c)+p(1-t) \}, \quad (1)$$

where

- V_a - land market auction price, rubles per hectare;

- V_0 - cadastral value of agricultural land, rubles per hectare;

- V_1 - cadastral value of agricultural land adjusted for the land rent growth, rubles per hectare;

- R_0 - land rent, rubles per hectare;

- g - land rent growth, %;

- t - income tax, %;

- p - land tax, %;

- k - interest rate, %;

- c - transaction costs, %;

- a - tax adjustment coefficient, calculated as $a=R_0(1+g) / [R_0(1+g) + (V_1-V_0)]$ [2].

The values of the mentioned above indicators were taken as follows:

- land rent value(R_0) was calculated on the base of the cadastral value of agricultural land treated as V_0 and interest rate (k) taken as 3% and used for determination of the value;
- annual land rent growth(g) was estimated at 12%;
- transaction costs(c) were estimated at 10%;
- income tax(t) was taken as 20 %;
- agricultural land tax(p) was estimated at. 3 % of cadastral land value;
- interest rate(k) was taken as 15.25 %.

The ratio between the agricultural land market auction price and agricultural land mortgage value was taken as 70 %. The rent regulators calculated based on agricultural land market auction prices in Kalmykia are shown in Table 1.

Table 1. Rent regulators, Republic of Kalmykia (draft).

Municipalities	Cadastral value of land, rubles/ha	Starting auction price of land, rubles/ha	Mortgage value of land, rubles/ha	Land tax rates, rubles/ha	Contract land rent rates, rubles/ha
Gorodovikovskoe	84,580	14,912	10,438	44.74	62.63
Iki-Burulskoe	10,760	1,904	1,332	5.71	7.99
Ketchenerovskoe	11,800	2,080	1,456	6.24	8.74
Laganskoe	2,800	494	345	1.48	2.07
Maloderbetovskoe	12,430	2,186	1,530	6.56	9.18
Oktyabr'skoe	4,200	740	518	2.22	3.11
Priyoutnenskoe	19,800	3,490	2,443	10.47	14.66
Sarpinskoe	13,570	2,397	1,678	7.19	10.07
Tselinnoe	10,980	1,939	1,357	5.82	8.14
Chernozemelskoe	2,900	511	358	1.53	2.15
Youstinskoe	3,150	546	382	1.64	2.29
Yashaltinskoe	39,050	6,874	4,812	20.62	28.87
Yashkul'skoe	2,440	2,115	1,481	6.34	8.88
Average	15,760	2,961	2,073	8.88	12.44

Land tax was calculated as .3 % of the starting auction price of agricultural land. In theory, the contract land rent rate can't be less than land tax rates. Otherwise, the landowner will not be interested to give land on lease.

Therefore, it is necessary to provide at least the average level of profitability for the landowner that can be taken as 40 % compared to the rate of land tax. It is also important to implement a logical framework methodology for designing agricultural land consolidation projects.

In this regard, one of the supergoals of agricultural land consolidation projects is to implement and develop agricultural land consolidation in order to increase the efficiency of agricultural production to eliminate hunger and food shortages as well as poverty due to the rapidly growing world population.

In this regard, the modified agricultural land consolidation project logical framework matrix has been designed (see Table 2).

Table 2. Agricultural land consolidation project logical framework matrix [2].

Narrative Summary	Verified Indicators	Means of Verification	Assumptions
Supergoals	Increase the efficiency of agricultural production. Ensure sustainable development of the agriculture.	Increasing the financial and economic efficiency of agricultural production	Growth of land rent, value, and price of agricultural land
Specific Objectives	Increase, optimization of the size and configuration of land plots, elimination of mosaic land ownership	Improving the efficiency of agricultural machinery use	The concentration of land ownership in the hands of efficient investors
Activities	List and composition of necessary land use planning work in physical terms	The volume of land use planning work in physical terms	Identification of owners and beneficiaries of agricultural land consolidation project
Investments	Financing of land use planning work	The investment required for the implementation of land use planning work	Attracting outside investors to finance agricultural land consolidation project
Investment sources	Ensuring targeted investment financing	Lending required to provide targeted financing for the agricultural land consolidation project	The Central Bank's policy and refinishing rate. Market interest rate. Inflation rate

4 CONCLUSION

The following measures must be implemented to strengthen the organizational as well as institutional sustainability of agricultural land consolidation development in Russia:

- agricultural land consolidation legislation must be revised and improved both at the federal as well as regional level;
- the institutional framework for implementation of agricultural land consolidation must be improved both at the federal as well as regional level too;
- the agricultural land auctions must be introduced to stimulate the development of the agricultural land market and agricultural land consolidation in the regions of Russia;
- the training and retraining programs related to agricultural land consolidation development issues must be introduced;
- the public relation campaign to strengthen people's ability to understand the role and importance of agricultural land consolidation development must be initiated;
- The pilot projects focused on agricultural land consolidation development should be launched in some of the regions to make a demonstration effect;
- The agricultural land consolidation development experience should be collected, scrutinized and disseminated [2].

REFERENCES

1. Rating of the largest owners of agricultural land in Russia in May 2020, URL:<ftp://ftp.agroxxi.ru>.
2. Sagaydak, Alexander, Sagaydak, Anna (2020) Agricultural land consolidation (Russian case study). Intercontinental Geoinformation Days. URL:<ftp://ftp.mersin.edu.tr/2020>.
3. The State (National) report on the status and use of lands in the Russian Federation in 2017, Rosreestr, 2018. URL:<ftp://ftp.rosreestr.ru>.
4. The Regional report on the status and use of lands in the Republic of Kalmykia in 2017, Kalmykiareestr, 2019. URL:<ftp://ftp.rosreestr.ru>.

CAPÍTULO 6

1D SPACE-TIME SOLUTION OF THE SPECIES DIFFUSION EQUATION WITH DOUBLE ENTRY BOUNDARY IN SPHERICAL FOODS¹

Data de submissão: 11/09/2024

Data de aceite: 27/09/2024

Juan Ignacio González Pacheco

Universidad Tecnológica Nacional
Facultad Regional Mendoza
Departamento de Ingeniería Química
Mendoza – Argentina
<https://orcid.org/0000-0002-4447-8562>

Mariela Beatriz Maldonado

CONICET
Universidad Tecnológica Nacional
Facultad Regional Mendoza
Departamento de Ingeniería Química
Mendoza – Argentina
<https://orcid.org/0000-0002-4188-8005>

Ariel Fernando Márquez Agüero

Universidad Tecnológica Nacional
Facultad Regional Mendoza
Departamento de Ingeniería Química
Mendoza – Argentina
<https://orcid.org/0000-0003-2330-7905>

Paula Anabella Giorlando Videla

Universidad Tecnológica Nacional
Facultad Regional Mendoza
Departamento de Ingeniería Química
Mendoza – Argentina
<https://orcid.org/0000-0001-5595-9225>

Leonel Nicolás Lisanti

Universidad Tecnológica Nacional
Facultad Regional Mendoza
Departamento de Ingeniería Química
Mendoza – Argentina
<https://orcid.org/0000-0002-8623-4953>

Carla Rocío Zaragoza

Universidad Tecnológica Nacional
Facultad Regional Mendoza
Departamento de Ingeniería Química
Mendoza – Argentina
<https://orcid.org/0000-0001-8262-7744>

Oscar Daniel Galvez

Universidad Tecnológica Nacional
Facultad Regional Mendoza
Departamento de Materias Básicas
Mendoza – Argentina
<https://orcid.org/0000-0003-4427-3994>

¹ The mathematical advancements detailed in this work contribute to the ongoing development of the doctoral thesis of Juan Ignacio González Pacheco, Chemical Engineer. Part of the outcomes derived from the proposed mathematical developments has been featured in the journal *Nature's Scientific Reports*, titled "Diffusion in biological media: a comprehensive numerical-analytical study via surface analysis and diffusivities calculation."

ABSTRACT: The following abstract details our development of a mathematical model to derive the solution of the diffusion equation of chemical species in 1D spherical coordinates. The study concentrates on the proposed boundary conditions for experiments,

aiming to quantify the transport and mechanism by which artificial and natural dyes, such as erythrosine and gardenia red, respectively, diffuse. We used pitted, calibrated, and desulfited cherries (*Prunus avium*). This work showcases the variation of species concentration concerning the radial position and time while considering third (Robin) and first-type (Dirichlet) boundary conditions, accounting for the cherry's morphology. This development's novelty lies in applying boundary conditions at the flesh-skin-osmotic solution interface, suggesting a double diffusion boundary of substances and introducing a method to calculate effective diffusivities. The methodology employed assumes, as a first approximation, a homogeneous and isotropic flesh with a unidirectional diffusion process, displaying zenithal and azimuthal flow symmetry. Dirichlet conditions were utilised to model a sphere with a hollow spherical centre. Moreover, we discussed the potential inclusion of convective conditions for future work during tests at low stirring speeds (<100 rpm) of the sweetener solution. As a result, a method is introduced to calculate effective diffusivities and concentration profiles in foods with hollow spherical geometry, assuming purely diffusive transport and no external resistance to mass transfer. The proposed condition (Dirichlet) is particularly suitable at high stirring frequencies (220 rpm), with the effective diffusivity being the sole variable to be determined. This study enables a deeper understanding of the transport of chemical species in hollow spherical foods, offering insights into the transport process and laying the groundwork for future research on phenomena with external convective resistance.

KEYWORDS: Mathematical model. Mass diffusion. Boundary conditions. Hollow spherical foods. Effective diffusivity.

SOLUCIÓN ESPACIO-TEMPORAL 1D DE LA ECUACIÓN DE DIFUSIÓN DE ESPECIES CON DOBLE FRONTERA DE INGRESO EN ALIMENTOS ESFÉRICOS

RESUMEN: En el presente trabajo presentamos el desarrollo de un modelo matemático para determinar la solución de la ecuación de difusión de especies químicas en coordenadas esféricas 1D, centrándonos en las condiciones de contorno propuestas para experimentos realizados y cuantificar el transporte y mecanismo en que difunden colorantes artificiales y naturales, como eritrosina y rojo gardenia respectivamente. Los ensayos se realizaron con cerezas (*Prunus avium*) descarozadas, calibradas y desulfitadas. Mostramos la variación de la concentración de especies en función de la posición radial y el tiempo, considerando condiciones de frontera de tercer tipo (Robin) y primer tipo (Dirichlet) teniendo en cuenta la morfología de la cereza. La innovación en el desarrollo radica en la aplicación de condiciones de contorno en la interfaz pulpa-piel-solución osmótica, planteando una doble frontera de ingreso de sustancias y la introducción de un método para calcular difusividades efectivas. La metodología empleada supone, como primera aproximación, que la pulpa es homogénea e isotrópica, con un proceso de difusión unidireccional, que exhibe simetría de flujo cenital y azimutal. Las condiciones de Dirichlet se utilizaron para modelar una esfera con centro esférico hueco. Además, discutimos la posibilidad de incluir condiciones convectivas para futuros trabajos para ensayos realizados a bajas velocidades de agitación (<100rpm) de la solución edulcorante. Como resultados, se introduce un método para calcular difusividades efectivas y perfiles de concentración en alimentos con geometría esférica hueca, asumiendo transporte puramente difusivo y sin resistencia externa

a la transferencia de masa. La condición propuesta (Dirichlet) resulta ser adecuada particularmente a altas frecuencias de agitación (220 rpm), siendo la difusividad efectiva la única variable a determinar. Este trabajo contribuye a la comprensión del transporte de especies químicas en alimentos esféricos huecos, ofreciendo conocimientos sobre el proceso de transporte y preparando el escenario para futuras investigaciones sobre fenómenos con resistencia convectiva externa.

PALABRAS CLAVE: Modelo matemático. Difusión de masa. Condiciones de contorno. Alimentos esféricos huecos. Difusividad efectiva.

1 INTRODUCTION

Mass diffusive phenomenon, the ubiquitous process driving molecules from high to low concentration, underpins a vast array of food processing and preservation techniques. Understanding its intricate movement within complex food matrices is paramount for optimising process efficiency, ensuring product quality, and extending shelf-life (Junqueira et al., 2021; Khubber et al., 2020; Mugi & Chandramohan, 2021). Mathematical modelling provides a powerful lens through which we can move beyond empirical observations and delve into the quantitative realm of mass transfer phenomena, deciphering the mechanisms governing diffusion in food (M. B. Maldonado et al., 2008; Pereira et al., 2023).

This chapter explores the interplay between diffusion and food engineering, focusing on how a mathematical model, often rooted in Fick's laws, can predict and analyse the movement of substances within food systems. These models provide a theoretical framework for quantifying the rate of mass transfer, enabling us to anticipate and control the impact of processing conditions on the final product (González Pacheco & Maldonado, 2024).

Over the years, a rich tapestry of mathematical models has been woven to capture the nuances of diffusion phenomena. From the elegant simplicity of Fick's laws (González-Pérez et al., 2022; Kian-Pour, 2023; Knee, 2019; Sayago, 2021), which describes diffusion as a gradient-driven process, to more sophisticated approaches that account for heterogeneity, concentration-dependent diffusion, and multicomponent interactions (Bordin et al., 2019; Jamali et al., 2020), these models provide a theoretical framework for understanding how molecules disperse in space and time.

Central to this framework is the concept of effective diffusivity, a measure of how readily molecules navigate the tortuous pathways within a given food matrix. Accurately determining this parameter is crucial for predicting the spatial and temporal distribution of solutes (R. C. da Silva et al., 2022; de Lima Ferreira et al., 2024), water activity, and essential for various food processing and preservation operations, including drying (Macedo et

al., 2022), osmotic dehydration (Meena et al., 2022; Sulistyawati et al., 2020), extraction (Janowicz et al., 2021), packaging (Oladzadabbasabadi et al., 2022), and other key factors influencing food quality and stability (Bae et al., 2020; Pandiselvam et al., 2021). This chapter explores analytical and numerical approaches for determining effective diffusivity (Pinheiro & Castro, 2023; Salehi et al., 2022, 2023), highlighting the strengths and limitations of each method in relation to specific food systems and processing conditions.

The applications of diffusion modelling in food engineering are wide-ranging and significant, encompassing activities such as optimising osmotic dehydration to enhance water removal while maintaining food quality (Brito et al., 2023; Calín-Sánchez et al., 2020; Junqueira et al., 2021), predicting pigment migration for visually appealing products (González Pacheco & Maldonado, 2024; M. Maldonado & González Pacheco, 2022), maximising extraction yields of valuable compounds (Zecchi & Gerla, 2020), and developing effective preservation strategies through an understanding of preservative and spoilage agent transport. Through the utilisation of a quantitative approach, we endeavour to analyse the complexities of diffusion with the objective of establishing an understanding of the governing principles of mass transfer in 1D food systems. This serves as a preliminary stage prior to the advancement to 2D and 3D models. This endeavour ultimately aims to facilitate control, and innovation in the production of safer, higher-quality, and more sustainable food products.

2 MATERIALS AND METHODS

2.1 MATERIALS

A 10-kilogram batch of *Prunus avium* cultivar Bing was acquired from Luján de Cuyo, Mayor Drummond, Mendoza, Argentina (coordinates in decimal degrees: -33.00443364309908; -68.86583423899584). The materials used in the study included Lactitol powder (DuPont Corporation, Wilmington, Delaware, USA), Maltitol powder (Shandong Lujian Biological Technology Co. Ltd, China), Xylitol powder (Shandong Lujian Biological Technology Co. Ltd, China), as well as Erythrosine powder dye (Macsen Labs, N.K Agrawal Group, India) and Red Gardenia powder dye (Omya Inc., Cincinnati, Ohio, USA).

2.2 METHODS

2.2.1 Processing and Impregnation

The cherries were carefully prepared by calibrating them to a size of 27 mm, pitting, and desulphiting them (sulphur anhydride at 1500 ppm) through immersion in

tap water baths at room temperature for 24 hours, with water renewal every 4 hours. The candying process was initiated using a multiple impregnation method, commonly referred to as the “French or Slow Method”. The sweetener solution with a concentration of 25 Bx was first impregnated, followed by a second impregnation with a 35 Bx syrup to avoid plasmolysis and wrinkles in the fruit (González Pacheco & Maldonado, 2024; M. Maldonado & González Pacheco, 2020, 2022). Erythrosine and red gardenia were added at varying concentrations (119, 238 and 357 ppm) to stain the fruits and observe their influence. The solution was maintained at a steady temperature (40, 50 and 60°C) and subjected to constant agitation to ensure homogeneity (220 rpm). The pH of the sweetening solution was regulated to maintain a specific range for desired outcomes. To maintain the pH of the sweetening solution within the desired range, an approach involving the addition of either 0.9 mL of 10% (w/V) citric acid or 0.3 mL of 10% (w/V) NaHCO₃ was executed (APHA, 2017). This procedure is instrumental in ensuring the pH remains between 4.2 and 4.8, leading to a controlled precipitation of the pigment within the cellular structure of the cherry. Consequently, this process enhances the fruit’s vibrant and aesthetically pleasing colouration (Azwanida et al., 2015).

2.2.2 Sampling Process

Cherry samples were randomly selected from multiple container zones for analysis. Cross-sections of the samples were acquired, and the luminosity (L), redness or greenness (a*), and blueness or yellowness (b*) (referred to in combination as CIELAB) were measured using a Minolta CR-400 colourimeter with illuminant D65 (natural light). These measurements were taken from specific points (2.63 mm, 5.26 mm, and 10.53 mm on average) from the centre of the cherry to assess colour properties.

2.3 MATHEMATICAL MODELLING

The experimental data underwent mathematical analysis during the colouration, impregnation process, or osmotic dehydration of fruits in sweetened solutions. This process involved fitting the data to a differential equation that governs the intricate molecular diffusion through the solid, porous hollow sphere constituting the cherry matrix.

2.3.1 Theory

2.3.1.1 Molecular diffusion through a porous solid matrix with spatially constant effective diffusivities subjected to variable boundary conditions. Modelled by double diffusion boundaries in a hollow sphere with constant initial conditions

The Bing variety fruit, illustrated in Figure 1, is medium-sized and heart-shaped. While it demonstrates good on-tree resilience, it is susceptible to cracking. This variety belongs to the Picota type, allowing for stemless harvesting and a central pit. This characteristic facilitates the assumption of an approximately spherical model for the diffusion model resolution, with the pit creating a hollow space at the centre.

Figure 1. Bing variety cherries.



Concerning mathematical modelling for species transfer, we have employed the Reynolds Transport Theorem (RTT) equation. Assuming a constant total molar concentration for the mixture and independent diffusion coefficients with respect to spatial coordinates, we can simplify and express the equation (1) in its tensor form (Bird et al., 2006):

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + (\bar{v}^* \cdot \nabla C_i) = \mathcal{D}_{ij} \nabla^2 C_i + R_i - \frac{C_i}{C} (R_i + R_j) \quad (1)$$

The molar concentration of species in the mixture is denoted as C_i , while D_{ij} represents the effective diffusivity for a binary system. The local average molar velocity of the mixture is represented by \bar{v}^* and the species unit volume production rate due to chemical reactions is denoted by R_i or R_j . The variable t represents time.

Hence, the one-dimensional, non-dimensional diffusion equation with constant effective diffusivities in the flesh (D_F) and skin (D_S), considering only the molecular diffusion of dyes as a transport mechanism within the fruit and without accounting for

the generation of substances through chemical reactions, can be expressed as a partial differential equation, denoted as equation (2) (Carslaw & Jaeger, 1959; Crank, 1979; Hahn & Özişik, 2012):

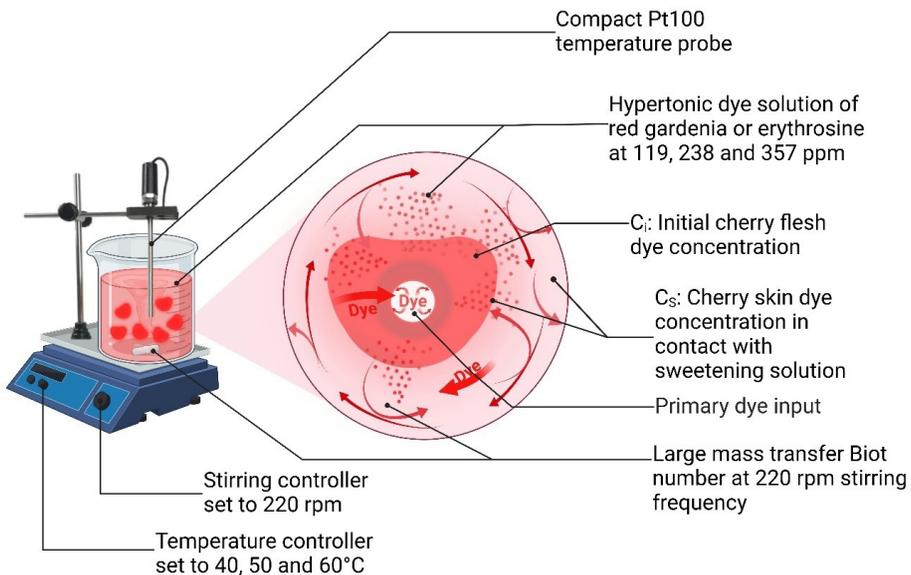
$$\frac{\partial C}{\partial \theta} = \frac{2}{R} \frac{\partial C}{\partial R} + \frac{\partial^2 C}{\partial R^2} \quad (2)$$

Where

$$\theta = \frac{D_{ij} t}{r_0^2}; R = \frac{r}{r_0}; C = \frac{C_{(t)} - C_s}{C_i - C_s}$$

Consider that theta, θ , is a non-dimensional time, R is a non-dimensional radius, C represents a non-dimensional concentration, $C_{(t)}$ denotes the dye concentration within the cherry flesh as time progresses, C_s represents the dye concentration in the cherry skin in contact with the sweetening solution (Zuritz & Maldonado, 2004), and C_i denotes the dye concentration within the cherry flesh at the beginning of the experiment (Figure 2).

Figure 2. Representation of the staining trials conducted with erythrosine and red gardenia at 119, 238, and 357 ppm and at 40, 50, and 60°C. Visualisation of the experimental conditions to provide a rationale for the boundary conditions defined in the mathematical framework. Created in BioRender. González Pacheco, J. (2024) BioRender.com/t24d848.

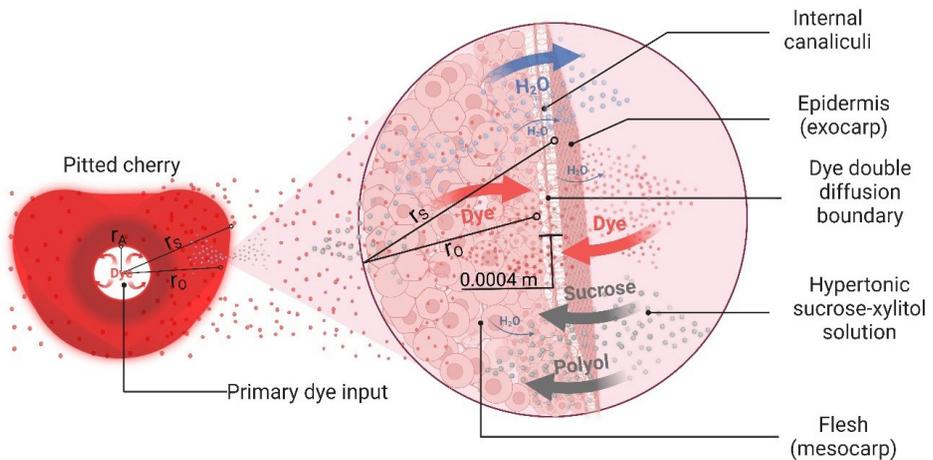


The physical properties of cherry flesh were initially approximated as homogeneous and isotropic, assuming a unidirectional radial diffusion process. The high agitation of the sweetening solution surrounding the inner and outer surfaces (220 rpm) led to the assumption that the concentration in these areas immediately equates

to the concentration of the liquid (large mass Biot number). Additionally, the thickness of the epidermis was considered much smaller than the radii of the inner and outer faces, allowing the difference in surface areas to be ignored and the thickness to be assumed as $r_s - r_o$. Moreover, it was deemed appropriate to assume that solute accumulation in the skin, represented by $r_s - r_o$, and consequently the resistance to species transfer, is negligible compared to the flux through the porous surface and the flux itself, which is given by the cherry skin with a thickness of 0.0004 m (Fig. 3).

Furthermore, we postulated that a double diffusion boundary exists at the flesh-skin interface of the fruit, attributed to the primary entry of colourant from the pitted area and an additional incoming flow through the porous matrix skin, which allows the entry of both soluble solids and colourant. This dual penetration phenomenon (Figure 3) will be mathematically modelled by implementing B.C.2, equation (6), a mixed boundary condition.

Figure 3. Visualisation of the primary movement patterns during the colouring, along with the dye penetration at the double diffusion boundary located at the junction between the flesh and the fruit's skin. Created in BioRender. González Pacheco, J. (2024) BioRender.com/t24d848.



2.3.2 CALCULATION

An alternative form of equation (2) was derived by utilising a fitting process for the redness parameter a^* , employing the least squares method with a linear approach. The objective of this process was to establish a relationship between the concentration of erythrosine or red gardenia dye, as described in equation (3), and the experimental data. This facilitated the derivation of a refined version of equation (2). This correlation provides an alternative method for presenting the transport of 1D species and their properties in general by introducing the redness parameter, a^* .

$$\frac{\partial a^*}{\partial \theta} = \frac{2}{R} \frac{\partial a^*}{\partial R} + \frac{\partial^2 a^*}{\partial R^2} \quad (3)$$

Subjected by the following dimensionless initial and boundary conditions:

$$I.C.: \text{At } \theta = 0 \quad a^* = \frac{a_i^* - a_s^*}{a_i^* - a_s^*} = 1 \quad \text{at } A \leq R \leq 1 \quad (4)$$

$$B.C.1: \text{At } \theta > 0 \quad a^* = \frac{a_s^* - a_s^*}{a_i^* - a_s^*} = 0 \quad \text{at } R = A \quad (5)$$

$$B.C.2: \text{At } \theta > 0 \quad \frac{\partial a^*}{\partial R} + \frac{D_S}{D_F} \left(\frac{r_0}{r_s - r_0} \right) a^* = 0 \quad \text{at } R = 1 \quad (6)$$

Where

$$\theta = \frac{D_{ij} t}{r_0^2}; R = \frac{r}{r_0}; A = \frac{r_A}{r_0}; a^* = \frac{a_{(t)}^* - a_s^*}{a_i^* - a_s^*}$$

In the context of the experiment, the dimensionless radius “A” is calculated as the ratio between r_A and r_0 . Additionally, the variables $a_{(t)}^*$, a_s^* and a_i^* are utilised to quantify the redness of the cherry flesh during the experiment. $a_{(t)}^*$ denotes the evolving redness of the cherry flesh over time, while a_s^* signifies the redness of the cherry skin upon contact with the sweetening solution. Lastly, a_i^* signifies the initial redness of the cherry flesh at the outset of the experiment.

On the other hand, we will begin by addressing the second boundary condition, B.C.2, equation (6), which is non-homogeneous. Due to this characteristic, the separation of variables method will be employed.

The solution to the primary non-homogeneous problem takes the following form:

$$a^*_{(R,\theta)} = \sum_n A_{n(\theta)} \Phi_n(R) \quad (7)$$

According to the orthogonality of $\Phi_n(R)$:

$$\int_A^1 a^*_{(R,\theta)} W_{(R)} \Phi_{m(R)} dR = \sum_n A_{n(\theta)} \int_A^1 W_{(R)} \Phi_{m(R)} \Phi_{n(R)} dR \quad (8)$$

Further:

$$\int_A^1 a^*_{(R,\Theta)} W_{(R)} \Phi_{m(R)} dR = b A_{m(\Theta)} \quad (9)$$

And:

$$A_{m(\Theta)} = \frac{1}{b} \int_A^1 a^*_{(R,\Theta)} W_{(R)} \Phi_{m(R)} dR \quad (10)$$

The addition of the function $W_{(R)}$ introduces orthogonality, ensuring that $\Phi_{m(R)}$ and $\Phi_{n(R)}$ are orthogonal to $W_{(R)}$ in $(A, 1)$.

$$\int_A^1 W_{(R)} \Phi_{m(R)} \Phi_{n(R)} dR = \begin{cases} 0 & \text{for } m \neq n \\ b & \text{for } m = n \end{cases}$$

Now, turning our attention to a homogeneous problem ($a^* = u$):

$$\frac{\partial u}{\partial \Theta} = \frac{2}{R} \frac{\partial u}{\partial R} + \frac{\partial^2 u}{\partial R^2} \quad (11)$$

$$I. C.: \quad \text{At } \Theta = 0 \quad u = 1 \quad \text{at} \quad A \leq R \leq 1 \quad (11.1)$$

$$B. C. 1: \quad \text{At } \Theta > 0 \quad u = 0 \quad \text{at} \quad R = A \quad (11.2)$$

$$B. C. 2: \quad \text{At } \Theta > 0 \quad \frac{\partial u}{\partial R} = 0 \quad \text{at} \quad R = 1 \quad (11.3)$$

We present a solution to the homogeneous equation (11). The subscripts on the functions denote the number of derivatives with respect to the corresponding variable.

$$u_{(R,\Theta)} = \mathfrak{R}_{(R)} \ddot{\mathcal{O}}_{(\Theta)} \quad (12)$$

$$\mathfrak{R}_{(R)} \ddot{\mathcal{O}}_{(\Theta)} + \frac{2}{R} \ddot{\mathcal{O}}_{(\Theta)} \mathfrak{R}_{(R)} = \mathfrak{R}_{(R)} \dot{\mathcal{O}}_{(\Theta)} \quad (12.1)$$

$$\frac{1}{\mathfrak{R}} \frac{d^2 \mathfrak{R}}{dR^2} + \frac{2}{\mathfrak{R}} \frac{d\mathfrak{R}}{dR} = \frac{1}{\ddot{\mathcal{O}}} \frac{d\dot{\mathcal{O}}}{d\Theta} = -\lambda^2 \quad (12.2)$$

In the given scenario, a positive constant is symbolised as λ^2 . To ensure that the solution approaches zero as time, Θ , increases, a negative constant, denoted as $-\lambda^2$, is deliberately selected. Opting for a positive constant or zero instead would lead to a solution that grows indefinitely as Θ progresses. From a mathematical perspective, this

selection would not correspond to the physical phenomenon that the solution must eventually approach finite boundary conditions.

Then:

$$\begin{cases} \ddot{\mathfrak{R}}R^2 + 2R\dot{\mathfrak{R}} + \lambda^2 R^2 \mathfrak{R} = 0 \\ \ddot{\mathfrak{O}} + \lambda^2 \mathfrak{O} = 0 \end{cases}$$

Whose solutions are:

$$\mathfrak{R}_{(\lambda_n R)} = R^{-\frac{1}{2}} \left[C_1 J_{\frac{1}{2}(\lambda_n R)} + C_2 Y_{\frac{1}{2}(\lambda_n R)} \right] \quad (13)$$

$$\mathfrak{O}_{\lambda_n} = C_3 e^{-\lambda_n^2 \theta} \quad (14)$$

We can consider $Y_{\frac{1}{2}(\lambda_n R)}$ as a Neumann function or Bessel function of the second kind by proposal, leading to:

$$\mathfrak{R}_{(\lambda_n R)} = R^{-\frac{1}{2}} \left[C_1 J_{\frac{1}{2}(\lambda_n R)} - C_2 J_{-\frac{1}{2}(\lambda_n R)} \right] \quad (15)$$

Bessel functions of the first kind can be explicitly expressed as follows:

$$J_n(\lambda R) = (\lambda R)^n \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m (\lambda R)^{2m}}{2^{2m+n} m! \Gamma(n+m+1)} \quad (16)$$

Then:

$$J_{\frac{1}{2}(\lambda R)} = \sqrt{\frac{2}{\pi \lambda R}} \sin \lambda R \quad \text{and} \quad J_{-\frac{1}{2}(\lambda R)} = \sqrt{\frac{2}{\pi \lambda R}} \cos \lambda R \quad (17)$$

By replacing equations (17) in equation (15):

$$\mathfrak{R}_{(\lambda_n R)} = R^{-\frac{1}{2}} \left[C_1 \sqrt{\frac{2}{\pi \lambda_n R}} \sin \lambda_n R - C_2 \sqrt{\frac{2}{\pi \lambda_n R}} \cos \lambda_n R \right] = \frac{1}{R} \left[C_1 \sqrt{\frac{2}{\pi \lambda_n}} \sin \lambda_n R - C_2 \sqrt{\frac{2}{\pi \lambda_n}} \cos \lambda_n R \right] \quad (18)$$

Finally:

$$u_{(R,\theta)} = \frac{1}{R} \left[C_1 \sqrt{\frac{2}{\pi \lambda_n}} \sin \lambda_n R - C_2 \sqrt{\frac{2}{\pi \lambda_n}} \cos \lambda_n R \right] e^{-\lambda_n^2 \theta} \quad (19)$$

Where $\mathbb{C}_1 = C_1 C_3$ and $\mathbb{C}_2 = C_2 C_3$.

We apply the B.C.1, equation (11.2) in expression (19):

$$u_{(A,\theta)} = 0 = \frac{1}{A} \left[\mathbb{C}_1 \sqrt{\frac{2}{\pi\lambda_n}} \sin \lambda_n A - \mathbb{C}_2 \sqrt{\frac{2}{\pi\lambda_n}} \cos \lambda_n A \right] e^{-\lambda_n^2 \theta}$$

$$\text{Hence: } -\frac{\mathbb{C}_2}{\mathbb{C}_1} = -\frac{\sin \lambda_n A}{\cos \lambda_n A} = -\tan \lambda_n A \quad (20)$$

When we differentiate equation (28) with respect to R at R=1 using the B.C.2, we obtain the following result

$$\left. \frac{\partial u}{\partial R} \right|_{R=1} = 0 = e^{-\lambda_n^2 \theta} \sqrt{\frac{2}{\pi\lambda_n}} [\mathbb{C}_1 (\lambda_n \cos \lambda_n - \sin \lambda_n) + \mathbb{C}_2 (\lambda_n \sin \lambda_n + \cos \lambda_n)]$$

Hence:

$$-\frac{\mathbb{C}_2}{\mathbb{C}_1} = \frac{(\lambda_n \cos \lambda_n - \sin \lambda_n)}{(\lambda_n \sin \lambda_n + \cos \lambda_n)} \quad (21)$$

Further:

$$-\frac{\mathbb{C}_2}{\mathbb{C}_1} = \frac{(\lambda_n \cos \lambda_n - \sin \lambda_n)}{(\lambda_n \sin \lambda_n + \cos \lambda_n)} = -\frac{\sin \lambda_n A}{\cos \lambda_n A} \quad (22)$$

Now, we can derive the equation of the homogeneous problem:

$$\sin \lambda_n (\lambda_n \sin \lambda_n A - \cos \lambda_n A) + \cos \lambda_n (\sin \lambda_n A + \lambda_n \cos \lambda_n A) = 0 \quad (23)$$

Equation (23) allows the calculation of the eigenvalues λ_n . Then:

$$\begin{aligned} u_{(R,\theta)} &= \mathfrak{R}_{(\lambda_n R)} \check{\mathcal{O}}_{(\theta)} = \frac{1}{R} \left[\mathbb{C}_1 \sqrt{\frac{2}{\pi\lambda_n}} \sin \lambda_n R - \mathbb{C}_2 \sqrt{\frac{2}{\pi\lambda_n}} \cos \lambda_n R \right] e^{-\lambda_n^2 \theta} \\ &= \frac{\mathbb{C}_1}{R} \sqrt{\frac{2}{\pi\lambda_n}} \left[\sin \lambda_n R - \frac{\mathbb{C}_2}{\mathbb{C}_1} \cos \lambda_n R \right] e^{-\lambda_n^2 \theta} \\ &= A_{n(\theta)} S_{(\lambda_n R)} \end{aligned} \quad (24)$$

There are clear similarities between equation (24), which represents the solution of the homogeneous problem, and equation (7), which represents the solution of the non-homogeneous problem.

$$S_{(\lambda_n R)} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{2}{\pi \lambda_n}} \left[\sin \lambda_n R - \frac{C_2}{C_1} \cos \lambda_n R \right]$$

$$= \frac{1}{R} \sqrt{\frac{2}{\pi \lambda_n}} \left[\sin \lambda_n R + \frac{(\lambda_n \cos \lambda_n - \sin \lambda_n)}{(\lambda_n \sin \lambda_n + \cos \lambda_n)} \cos \lambda_n R \right] \cong \Phi_{n(R)} \quad (25)$$

Whilst $A_{n(\theta)}$ will be $A_{n(\theta)} = C_1 e^{-\lambda_n^2 \theta}$, to be determined from the non-homogeneous solution. If we multiply equation (7) by $\Phi_{n(R)}$ and $w(R) = R^2$, and integrating from $R = A$ to $R = 1$:

$$\int_A^1 a^*_{(R,\theta)} R^2 \Phi_{n(R)} dR = \sum_n A_{n(\theta)} \int_A^1 R^2 \Phi_{n(R)}^2 dR, \text{ solving for } A_{m(\theta)} :$$

$$A_{m(\theta)} = \frac{\int_A^1 a^*_{(R,\theta)} W_{(R)} \Phi_{m(R)} dR}{\int_A^1 R^2 \Phi_{m(R)}^2 dR} = \frac{1}{b} \int_A^1 a^*_{(R,\theta)} R^2 \Phi_{m(R)} dR \quad (26)$$

$$\text{Where: } b = \int_A^1 R^2 \Phi_{m(R)}^2 dR \quad (27)$$

The subsequent step involves establishing an ordinary differential equation for $A_{m(\theta)}$. We proceed by deriving equation (26) with respect to the dimensionless time θ . Notably, as θ does not influence the integration limits, the following equation is derived:

$$\frac{dA_{m(\theta)}}{d\theta} = \frac{1}{b} \int_A^1 \left(\frac{\partial^2 a^*}{\partial R^2} \right) R^2 \Phi_{m(R)} dR + \frac{2}{b} \int_A^1 \left(\frac{\partial a^*}{\partial R} \right) R \Phi_{m(R)} dR \quad (28)$$

Upon substituting equation (25) into equation (27) and solving for “b”, this can be determined as:

$$b = \frac{1}{\pi \lambda_n} \left\{ \left[(1 - A) + \frac{\sin(2\lambda_n A) - \sin(2\lambda_n)}{2\lambda_n} \right] \right.$$

$$+ \frac{2}{\lambda_n} \frac{[\lambda_n \cos(\lambda_n) - \sin(\lambda_n)]}{[\lambda_n \sin(\lambda_n) + \cos(\lambda_n)]} [\sin^2(\lambda_n) - \sin^2(\lambda_n A)]$$

$$\left. + \frac{[\lambda_n \cos(\lambda_n) - \sin(\lambda_n)]^2}{[\lambda_n \sin(\lambda_n) + \cos(\lambda_n)]^2} \left[(1 - A) - \frac{\sin(2\lambda_n A) - \sin(2\lambda_n)}{2\lambda_n} \right] \right\} \quad (30)$$

If equation (25) is substituted into equation (28), the resultant outcome will be as follows:

$$\begin{aligned} \frac{dA_{m(\theta)}}{d\theta} &= \frac{1}{b} \sqrt{\frac{2}{\pi\lambda_n}} \int_A^1 \left(\frac{\partial^2 a^*}{\partial R^2} \right) R \left[\sin(\lambda_n R) + \frac{[\lambda_n \cos(\lambda_n) - \sin(\lambda_n)]}{[\lambda_n \sin(\lambda_n) + \cos(\lambda_n)]} \cos(\lambda_n R) \right] dR \\ &+ \frac{2}{b} \sqrt{\frac{2}{\pi\lambda_n}} \int_A^1 \left(\frac{\partial a^*}{\partial R} \right) \left[\sin(\lambda_n R) + \frac{[\lambda_n \cos(\lambda_n) - \sin(\lambda_n)]}{[\lambda_n \sin(\lambda_n) + \cos(\lambda_n)]} \cos(\lambda_n R) \right] dR \quad (31) \end{aligned}$$

We will now proceed with solving the ordinary differential equation for $A_{m(\theta)}$:

$$\begin{aligned} \frac{dA_{m(\theta)}}{d\theta} &= \frac{1}{b} \sqrt{\frac{2}{\pi\lambda_n}} \int_A^1 \left(\frac{\partial a^*}{\partial R} \right) \left\{ \left[\sin(\lambda_n R) + \frac{[\lambda_n \cos(\lambda_n) - \sin(\lambda_n)]}{[\lambda_n \sin(\lambda_n) + \cos(\lambda_n)]} \cos(\lambda_n R) \right] \right. \\ &\quad \left. - R\lambda_n \left[\cos(\lambda_n R) - \frac{[\lambda_n \cos(\lambda_n) - \sin(\lambda_n)]}{[\lambda_n \sin(\lambda_n) + \cos(\lambda_n)]} \sin(\lambda_n R) \right] \right\} dR \\ &= \frac{1}{b} \sqrt{\frac{2}{\pi\lambda_n}} \left[a^*_{(R,\theta)} \left[\left[\sin(\lambda_n R) + \frac{[\lambda_n \cos(\lambda_n) - \sin(\lambda_n)]}{[\lambda_n \sin(\lambda_n) + \cos(\lambda_n)]} \cos(\lambda_n R) \right] \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - R\lambda_n \left[\cos(\lambda_n R) - \frac{[\lambda_n \cos(\lambda_n) - \sin(\lambda_n)]}{[\lambda_n \sin(\lambda_n) + \cos(\lambda_n)]} \sin(\lambda_n R) \right] \right] \right] \frac{1}{A} \\ &\quad - \frac{1}{b} \sqrt{\frac{2}{\pi\lambda_n}} \int_A^1 a^*_{(R,\theta)} \lambda_n^2 R \left[\sin(\lambda_n R) \right. \\ &\quad \left. + \frac{[\lambda_n \cos(\lambda_n) - \sin(\lambda_n)]}{[\lambda_n \sin(\lambda_n) + \cos(\lambda_n)]} \cos(\lambda_n R) \right] dR \quad (32) \end{aligned}$$

It is noted that by multiplying and dividing the integral of equation (32) by R and rearranging the terms, we can derive the expression for $A_{m(\theta)}$ multiplied by λ_n^2 .

$$\begin{aligned} \frac{dA_{m(\theta)}}{d\theta} &= \frac{1}{b} \sqrt{\frac{2}{\pi\lambda_n}} \int_A^1 \left(\frac{\partial a^*}{\partial R} \right) \left\{ \left[\sin(\lambda_n R) + \frac{[\lambda_n \cos(\lambda_n) - \sin(\lambda_n)]}{[\lambda_n \sin(\lambda_n) + \cos(\lambda_n)]} \cos(\lambda_n R) \right] \right. \\ &\quad \left. - R\lambda_n \left[\cos(\lambda_n R) - \frac{[\lambda_n \cos(\lambda_n) - \sin(\lambda_n)]}{[\lambda_n \sin(\lambda_n) + \cos(\lambda_n)]} \sin(\lambda_n R) \right] \right\} dR \\ &= \frac{1}{b} \sqrt{\frac{2}{\pi\lambda_n}} \left[a^*_{(R,\theta)} \left[\left[\sin(\lambda_n R) + \frac{[\lambda_n \cos(\lambda_n) - \sin(\lambda_n)]}{[\lambda_n \sin(\lambda_n) + \cos(\lambda_n)]} \cos(\lambda_n R) \right] \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - R\lambda_n \left[\cos(\lambda_n R) - \frac{[\lambda_n \cos(\lambda_n) - \sin(\lambda_n)]}{[\lambda_n \sin(\lambda_n) + \cos(\lambda_n)]} \sin(\lambda_n R) \right] \right] \right] \frac{1}{a} \\ &\quad - \lambda_n^2 A_{m(\theta)} \quad (33) \end{aligned}$$

To address equation (33), we can resolve it by utilising the equalities outlined in equation (22).

✓ At R=1:

$$a^*_{(R,\theta)} \left\{ \frac{\sin \lambda (\lambda \sin \lambda A - \cos \lambda A) + \cos \lambda (\sin \lambda A + \lambda \cos \lambda A)}{\cos \lambda A} \right\} = 0 \quad (34)$$

✓ At R=A:

$$a^*_{(R,\theta)} \left\{ \sin \lambda R + \left(\frac{\lambda_n \cos \lambda_n - \sin \lambda_n}{\lambda_n \sin \lambda_n + \cos \lambda_n} \right) \cos \lambda_n R - \lambda_n R \left[\cos \lambda_n R - \left(\frac{\lambda_n \cos \lambda_n - \sin \lambda_n}{\lambda_n \sin \lambda_n + \cos \lambda_n} \right) \sin \lambda_n R \right] \right\} \Big|_A = 0 \quad (35)$$

Hence:

$$\frac{dA_{m(\theta)}}{d\theta} + \lambda_n^2 A_{m(\theta)} = \frac{1}{b} \sqrt{\frac{2}{\pi \lambda_n}} \left\{ \left(\frac{\partial a^*}{\partial R} \right)_{R=1} \left[\sin \lambda_n + \left(\frac{\lambda_n \cos \lambda_n - \sin \lambda_n}{\lambda_n \sin \lambda_n + \cos \lambda_n} \right) \cos \lambda_n \right] \right\} \quad (36)$$

Furthermore, by B.C.2, equation (6), we know that $\left. \frac{\partial a^*}{\partial R} \right|_{R=1} = -\frac{D_S}{D_F} \left(\frac{r_0}{r_s - r_0} \right) a^*$.

Replacing equation (6) in (36), we further define: $W = \frac{1}{b} \sqrt{\frac{2}{\pi \lambda_n}} \left\{ \frac{D_S}{D_F} \left(\frac{r_0}{r_s - r_0} \right) \left[\sin \lambda_n + \left(\frac{\lambda_n \cos \lambda_n - \sin \lambda_n}{\lambda_n \sin \lambda_n + \cos \lambda_n} \right) \cos \lambda_n \right] \right\}$. Furthermore, commencing from the definition of a^* , it can be expressed as: $a^* = \frac{a^*(t) - a^*_s}{a^*_i - a^*_s}$. In this definition, both a^*_s and a^*_i remain constant and do not vary according to R or θ . Whereas $a^*(t)$ at R=1, Since R is fixed, it will only depend on time.

Consequently, it is plausible to consider $a^* = \xi_{(\theta)}$. Then:

$$\frac{dA_{m(\theta)}}{d\theta} + \lambda_n^2 A_{m(\theta)} = -W \xi_{(\theta)} \quad (37)$$

Equation (37) represents the ordinary differential equation for $A_{m(\theta)}$, providing the solution needed to solve the final equation (7). Employing $e^{\lambda^2 \theta}$ as the integration factor, and using the initial condition $a^*_{(R,\theta)} = 1$, considering the definition in equation (26):

$$A_{m(\theta)} = \left(\frac{1}{b} \int_A^1 R^2 \Phi_{m(R)} dR - W \int_0^\theta \xi_{(\theta)} e^{\lambda_n^2 \theta} d\theta \right) e^{-\lambda_n^2 \theta} \quad (38)$$

3 RESULTS AND DISCUSSION

In order to establish a relationship for $\xi_{(\theta)}$, we can refer to equation (14), which provides the proposed temporal solution for the homogeneous problem: $\check{\theta}_{\lambda_n} = C_3 e^{-\lambda_n^2 \theta}$. This expression represents a constant multiplied by an exponential function that decreases with time. It is well-established, both analytically and experimentally, that the function $\xi_{(\theta)}$ follows an exponential decay over time, akin to the Arrhenius equation.

Therefore, we propose a model as follows: $\xi_{(\theta)} = C_0 e^{-C_5 \theta}$ (39)

Upon substituting equation (39) into the second integral of equation (38) and solving it:

$$A_{m(\theta)} = \left(\frac{1}{b} \int_A^1 R^2 \Phi_{m(R)} dR - \frac{WC_0}{\lambda_n^2 - C_5} \left[e^{(\lambda_n^2 - C_5)\theta} - 1 \right] \right) e^{-\lambda_n^2 \theta} \quad (40)$$

Upon substitution of equation (40) into equation (7):

$$a^*_{(R,\theta)} = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{b} \int_A^1 R^2 \Phi_{n(R)} dR - \frac{WC_0}{\lambda_n^2 - C_5} \left[e^{(\lambda_n^2 - C_5)\theta} - 1 \right] \right) e^{-\lambda_n^2 \theta} \Phi_{n(R)} \quad (41)$$

The average volumetric parameter, denoted as $a_{V^*}^*(\theta)$ will be determined through integration using the following expression:

$$a_{V^*}^*(\theta) = \frac{3}{(1-A^3)} \int_A^1 a^*_{(R,\theta)} R^2 dR \quad (42)$$

Hence, by substituting equation (41) into expression (42), the evolution of the dimensionless volumetric parameter $a_{V^*}^*(\theta)$ with respect to the dimensionless time θ can be derived. This analytical representation can be expanded as an infinite series, as detailed in equation (43). It is an adapted form of the original equation initially proposed by Maldonado & González Pacheco (2022) and verified by González Pacheco & Maldonado (2024).

$$a_{V^*}^*(\theta) = \frac{3}{(1-A^3)} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{1}{b} \left[\int_A^1 R^2 \Phi_{n(R)} dR \right]^2 - \frac{WC_0}{\lambda_n^2 - C_5} \left[e^{(\lambda_n^2 - C_5)\theta} - 1 \right] \int_A^1 R^2 \Phi_{n(R)} dR \right\} e^{-\lambda_n^2 \theta} \quad (43)$$

The effective diffusion coefficients and eigenvalues λ_n were determined using an iterative nonlinear regression method in conjunction with *GraphPad PRISM® Software (V9.5.1, MA, USA)*, employing the least squares method. Furthermore, we utilised the minimum chi-square method to assess the model's suitability. When dealing with a large mass transfer Biot number under the given conditions and the specified boundary condition (equation 5), it is important to note that significant truncation errors may occur, especially during the initial stages of the process. It is considered inappropriate to rely on nonlinear regression with a limited number of terms in the series of analytical solutions to obtain precise results for determining effective diffusivity. As a result, the first 220 terms of the analytical solution were incorporated alongside the optimiser (W. P. da Silva et al., 2009, 2018). We will now adopt a function to account for the temporal variation of the volumetric parameter $a_{V^*}^*(\theta)$:

$$C_0 = \frac{6}{(1-A^3)} R \lambda_n^2 \quad (44)$$

$$C_5 = \lambda_n^{2.0031} \quad (45)$$

Where:

$$R_{\lambda_1} = (B_3 C_3) - (D_3 E_3) + A \lambda_1 (B_3 E_3 + D_3 C_3) \quad (46)$$

Additionally:

$$B_3 = \frac{\cos(\lambda_n A)}{\lambda_n} \quad (47)$$

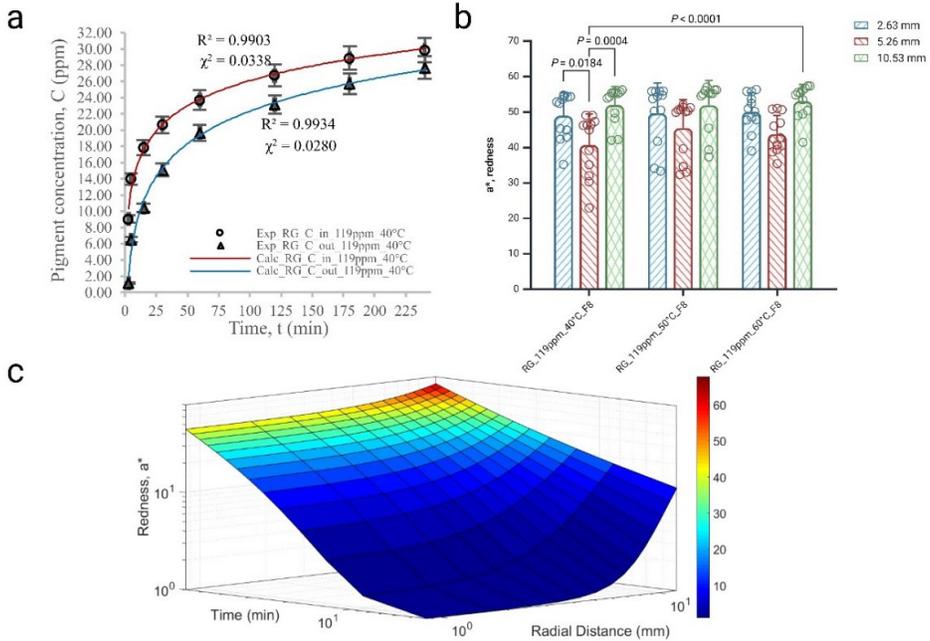
$$C_3 = \frac{1}{\lambda_n} [\sin(\lambda_n) - \sin(\lambda_n A)] + [A \cos(\lambda_n A) - \cos(\lambda_n)] \quad (48)$$

$$D_3 = \frac{\sin(\lambda_n A)}{\lambda_n} \quad (49)$$

$$E_3 = \frac{1}{\lambda_n} [\cos(\lambda_n) - \cos(\lambda_n A)] + [\sin(\lambda_n) - A \sin(\lambda_n A)] \quad (50)$$

On the other hand, W. P. da Silva et al. (2018) conducted an investigation using a convective-type boundary condition to simulate pure diffusive transport and convective phenomena. The study emphasised the existence of external resistance to mass transfer at low stirring frequencies (<100 rpm) during the extraction process of anthocyanin dye from jambolan (*Syzygium cumini* (L.)). Similarly, in our current research, we propose a method for calculating effective diffusivities and concentration profiles (Fig. 4.a.) in cherries (*Prunus avium*) assuming purely diffusive transport and neglecting external resistance to mass transfer. We also analysed the sensitivity of a^* based on the location within the cherry flesh. Our findings revealed a pronounced dye penetration at the periphery, followed by penetration through the centre of the cherry ($p < 0.05$). The results indicate a double diffusion boundary at the cherry's flesh-skin interface (Fig. 4.b.). We generated surface graphs to illustrate the evolution of the gardenia red dye concentration, denoted as "redness," as a function of both time and radial distance within the cherries. The presence of a double diffusion boundary at approximately 12 mm is discernible in the visual representation (Fig. 4.c.). The boundary condition advocated in our study (equation 5) is considered appropriate, particularly at a high stirring frequency of 220 rpm, where the principal variable requiring determination is the effective mass diffusivity, given a large Biot (Bi) number. However, we intend to explore convective boundary conditions in future work to clarify the transport mechanism of substances at low stirring velocities.

Figure 4. a-c. Time-dependent fluctuations in the input (in) and output (out) concentrations of red gardenia (RG) dye at 119 ppm and temperature of 40°C. These fluctuations were analysed using the hollow sphere model. Data was fitted to the analytical model using 220 terms of the infinite series. Following adjustments to the concentration values, the determination coefficient (R^2) exceeded 99%, and a minimal chi-square value (χ^2) was achieved (a). Sensitivity of the redness parameter a^* to the position inside the cherry (2.63, 5.26, and 10.53 mm measured from the centre). Data are expressed as mean \pm SD, two-way ANOVA with Tukey multiple comparisons test, with statistical significance defined as $p < 0.05$ (b). Surface plot depicting the variation of red gardenia dye concentration profile, expressed as redness, as a function of time and radial distance within cherries at 40°C, with a concentration of 119ppm, respectively (c). Figure 4.b. was created in BioRender. González Pacheco, J. (2024) BioRender.com/t24d848.



4 CONCLUSIONS

The mathematical model developed in this study provides insights into the diffusion of chemical species in 1D spherical coordinates, particularly focusing on hollow spherical foods. The application of boundary conditions at the interface of the flesh-skin-osmotic solution and the introduction of a method to calculate effective diffusivities represent advancements in the understanding of mass transport phenomena in such food geometries. The findings presented in this work offer knowledge regarding the transport processes in hollow spherical foods and pave the way for future investigations into phenomena involving external convective resistance. The quantitative analysis of species diffusion in this context contributes to the understanding of mass transport in food systems and holds the potential for enhancing food processing and preservation techniques.

REFERENCES

- APHA. (2017). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. Federation. Water Environmental American Public Health Association (APHA), Washington, DC, USA. Federation. Washington DC.
- AZWANIDA, N. N., HUI, M. S., AFANDI, A., MOHAMED, S., K, Z. A., AYOB, A., RUSLI, N., RASAT, M. S. M., & MOHAMED, M. (2015). Color Stability Evaluation of Pigment Extracted from *Hylocereus polyrhizus*, *Clitorea ternatae* and *Pandanus amaryllifolius* as Cosmetic Colorants and Premarket Survey on Customer Acceptance on Natural Cosmetic Product. **Journal of Tropical Resources and Sustainable Science (JTRSS)**, 3(1). <https://doi.org/10.47253/jtrss.v3i1.690>
- BAE, S., CHOI, J. Y., LEE, H. J., KIM, J., & MOON, K. D. (2020). The effect of osmotic dehydration pretreatment with sweeteners on the quality of dried aronia berries. **Korean Journal of Food Preservation**, 27(4). <https://doi.org/10.11002/KJFP.2020.27.4.468>
- BIRD, R. B., STEWART, W. E., & LIGHTFOOT, E. N. (2006). Transport Phenomena. In **Transport Phenomena** (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- BORDIN, M. S. P., BORSATO, D., CREMASCO, H., GALVAN, D., SILVA, L. R. C., ROMAGNOLI, É. S., & ANGILELLI, K. G. (2019). Mathematical modeling of multicomponent NaCl and KCl diffusion process during the salting of pre-cooked champignon mushrooms. **Food Chemistry**, 273, 99–105. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2018.01.188>
- BRITO, J. G., GOMES, J. P., DA SILVA, W. P., DA SILVA E SILVA, C. M. D. P., AIRES, K. L. C. A. F., & AIRES, J. E. F. (2023). Osmotic dehydration kinetics of banana slices with peel. **Comunicata Scientiae**, 14. <https://doi.org/10.14295/CS.v14.3423>
- CALÍN-SÁNCHEZ, Á., LIPAN, L., CANO-LAMADRID, M., KHARAGHANI, A., MASZTALERZ, K., CARBONELL-BARRACHINA, Á. A., & FIGIEL, A. (2020). Comparison of Traditional and Novel Drying Techniques and Its Effect on Quality of Fruits, Vegetables and Aromatic Herbs. **Foods**, 9(9), 1261. <https://doi.org/10.3390/FOODS9091261>
- CARSLAW, H. S., & JAEGER, J. C. (1959). **Conduction of Heat in Solids** (2nd ed. Ox).
- CRANK, J. (1979). **The mathematics of diffusion**. Oxford university press.
- DA SILVA, R. C., DA SILVA, W. P., GOMES, J. P., DE MELO QUEIROZ, A. J., DE FIGUEIRÊDO, R. M. F., DE LIMA, A. G. B., ROCHA, A. P. T., DA SILVA, L. D., DE LIMA FERREIRA, J. P., DA COSTA SANTOS, D., & DE ANDRADE, R. O. (2022). A New Empirical Model for Predicting Intermittent and Continuous Drying of “Neve” Melon (*Cucumis melo* sp.) Seeds. **Agriculture** (Switzerland), 12(3). <https://doi.org/10.3390/agriculture12030328>
- DA SILVA, W. P., NUNES, J. S., GOMES, J. P., DE ARAÚJO, A. C., & E SILVA, C. M. D. P. S. (2018). Description of jambolan (*Syzygium cumini* (L.)) anthocyanin extraction kinetics at different stirring frequencies of the medium using diffusion models. **Heat and Mass Transfer/Waerme- Und Stoffuebertragung**, 54(11). <https://doi.org/10.1007/s00231-018-2349-8>
- DA SILVA, W. P., PRECKER, J. W., E SILVA, C. M. D. P. S., & E SILVA, D. D. P. S. (2009). Determination of the effective diffusivity via minimization of the objective function by scanning: Application to drying of cowpea. **Journal of Food Engineering**, 95(2). <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.05.008>
- DE LIMA FERREIRA, J. P., DA SILVA, W. P., PAIVA, Y. F., & AMADEU, L. T. S. (2024). Impact of ultrasound pretreatment on banana chip production by convective drying using hot air: Consideration of shrinkage and variable effective mass diffusivity in the process description. **Journal of Food Process Engineering**, 47(3). <https://doi.org/10.1111/jfpe.14586>

GONZÁLEZ-PÉREZ, J. E., ROMO-HERNÁNDEZ, A., RAMÍREZ-CORONA, N., & LÓPEZ-MALO, A. (2022). Modeling mass transfer during osmodehydration of apple cubes with sucrose or apple juice concentrate solutions: Equilibrium estimation, diffusion model, and state observer-based approach. **Journal of Food Process Engineering**, 45(10), e14125. <https://doi.org/10.1111/JFPE.14125>

GONZÁLEZ PACHECO, J. I., & MALDONADO, M. B. (2024). Diffusion in biological media: a comprehensive numerical-analytical study via surface analysis and diffusivities calculation. **Scientific Reports**, 14(1), 1-18. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-67348-4>

HAHN, D. W., & ÖZİŞİK, M. N. (2012). Heat Conduction: Third Edition. In **John Wiley and Sons**. John Wiley and Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118411285>

JAMALI, S. H., BARDOW, A., VLUGT, T. J. H., & MOULTOS, O. A. (2020). Generalized Form for Finite-Size Corrections in Mutual Diffusion Coefficients of Multicomponent Mixtures Obtained from Equilibrium Molecular Dynamics Simulation. **Journal of Chemical Theory and Computation**, 16(6), 3799–3806. https://doi.org/10.1021/ACS.JCTC.0C00268/ASSET/IMAGES/LARGE/CT0C00268_0004.JPEG

JANOWICZ, M., CIURZYŃSKA, A., & LENART, A. (2021). Effect of Osmotic Pretreatment Combined with Vacuum Impregnation or High Pressure on the Water Diffusion Coefficients of Convection Drying: Case Study on Apples. **Foods** 2021, Vol. 10, Page 2605, 10(11), 2605. <https://doi.org/10.3390/FOODS10112605>

JUNQUEIRA, J. R. DE J., CORRÊA, J. L. G., DE MENDONÇA, K. S., DE MELLO JUNIOR, R. E., & SOUZA, A. U. (2021). Modeling mass transfer during osmotic dehydration of different vegetable structures under vacuum conditions. **Food Science and Technology** (Brazil), 41(2). <https://doi.org/10.1590/fst.02420>

KHUBBER, S., CHATURVEDI, K., TAGHI GHARIBZAHEDI, S. M., CRUZ, R. M. S., LORENZO, J. M., GEHLOT, R., & BARBA, F. J. (2020). Non-conventional osmotic solutes (honey and glycerol) improve mass transfer and extend shelf life of hot-air dried red carrots: Kinetics, quality, bioactivity, microstructure, and storage stability. **LWT**, 131. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109764>

KIAN-POUR, N. (2023). Impact of Microwave-Starch-Blanching on the Drying Kinetics, Transport and Thermophysical Properties of Green Almond. **Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 13(1). <https://doi.org/10.21597/jist.1166340>

KNEE, M. (2019). Rapid Measurement of Diffusion of Gas Through the Skin of Apple Fruits. **HortScience**, 26(7). <https://doi.org/10.21273/hortsci.26.7.885>

MACEDO, L. L., CORRÊA, J. L. G., DA SILVA ARAÚJO, C., & VIMERCATI, W. C. (2022). Effect of osmotic agent and vacuum application on mass exchange and qualitative parameters of osmotically dehydrated strawberries. **Journal of Food Processing and Preservation**, 46(7). <https://doi.org/10.1111/jfpp.16621>

MALDONADO, M. B., ZURITZ, C. A., & ASSOF, M. V. (2008). Diffusion of glucose and sodium chloride in green olives during curing as affected by lye treatment. **Journal of Food Engineering**, 84(2), 224-230. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.04.033>

MALDONADO, M., & GONZÁLEZ PACHECO, J. (2020). Shrinkage phenomenon in cherries during osmotic dehydration. **Annals. Food Science and Technology**, 21(1), 19–30. http://www.afst.valahia.ro/images/documente/2020/1.2_Maldonado.pdf

MALDONADO, M., & GONZÁLEZ PACHECO, J. (2022). Mathematical modelling of mass transfer phenomena for sucrose and lactitol molecules during osmotic dehydration of cherries. **Heliyon**, 8(1), e08788. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2022.E08788>

MEENA, N., PRINCE, M. V., & SREEJA, R. (2022). Optimization of process parameters for ultrasound-assisted osmotic dehydration of pineapple slices using response surface methodology. **Journal of Food Processing and Preservation**, 46(9). <https://doi.org/10.1111/JFPP:16507>

MUGI, V. R., & CHANDRAMOHAN, V. P. (2021). Shrinkage, effective diffusion coefficient, surface transfer coefficients and their factors during solar drying of food products – A review. **Solar Energy**, 229. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.07.042>

OLADZADABBASABADI, N., MOHAMMADI NAFCHI, A., GHASEMLOU, M., ARIFFIN, F., SINGH, Z., & AL-HASSAN, A. A. (2022). Natural anthocyanins: Sources, extraction, characterization, and suitability for smart packaging. **Food Packaging and Shelf Life**, 33, 100872. <https://doi.org/10.1016/J.FPSL.2022.100872>

PANDISELVAM, R., TAK, Y., OLUM, E., SUJAYASREE, O. J., TEKGÜL, Y., ÇALIŞKAN KOÇ, G., KAUR, M., NAYI, P., KOTHAKOTA, A., & KUMAR, M. (2021). Advanced osmotic dehydration techniques combined with emerging drying methods for sustainable food production: Impact on bioactive components, texture, color, and sensory properties of food. **Journal of Texture Studies**. <https://doi.org/10.1111/JTXS.12643>

PEREIRA, M. T. L., DE OLIVEIRA FARIAS, V. S., DA SILVA JÚNIOR, A. F., DO NASCIMENTO LIMA, A. R., VIEIRA, V. B., DE MEDEIROS, R. A., DA SILVA, W. P., FRANCO, C. M. R., & DE ATAÍDE, J. S. P. (2023). Analysis of drying of melon peels using numerical solution of the diffusion equation. **Journal of Food Process Engineering**, 46(3). <https://doi.org/10.1111/jfpe.14267>

PINHEIRO, M. N. C., & CASTRO, L. M. M. N. (2023). Effective moisture diffusivity prediction in two Portuguese fruit cultivars (Bravo de Esmolfe apple and Madeira banana) using drying kinetics data. **Heliyon**, 9(7). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17741>

SALEHI, F., CHERAGHI, R., & RASOULI, M. (2022). Mass transfer kinetics (soluble solids gain and water loss) of ultrasound-assisted osmotic dehydration of apple slices. **Scientific Reports**, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-19826-w>

SALEHI, F., CHERAGHI, R., & RASOULI, M. (2023). Mass transfer analysis and kinetic modeling of ultrasound-assisted osmotic dehydration of kiwifruit slices. **Scientific Reports**, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-39146-x>

SAYAGO, U. F. C. (2021). Design and development of a biotreatment of *E. crassipes* for the decontamination of water with Chromium (VI). **Scientific Reports**, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88261-0>

SULISTYAWATI, I., VERKERK, R., FOGLIANO, V., & DEKKER, M. (2020). Modelling the kinetics of osmotic dehydration of mango: Optimizing process conditions and pre-treatment for health aspects. **Journal of Food Engineering**, 280, 109985. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2020.109985>

ZECCHI, B., & GERLA, P. (2020). Effective diffusion coefficients and mass flux ratio during osmotic dehydration considering real shape and shrinkage. **Journal of Food Engineering**, 274. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109821>

ZURITZ, C. A., & MALDONADO, M. B. (2004). A simple method to determine diffusion of sodium in the epidermis of green olives. **Journal of Food Process Engineering**, 27(5), 328--344. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2004.00466.x>

CAPÍTULO 7

MODELO MATEMÁTICO DE DIFRACCIÓN EN REGIÓN DE FRESNEL CONVERGENTE Y DIVERGENTE DE UNA LENTE ESFÉRICA

Data de submissão: 09/11/2024

Data de aceite: 18/11/2024

Esteban Andrés Zárate

Universidad Juárez
Autónoma de Tabasco
División Académica de
Ciencias Básicas
Cunduacán Tabasco, México
<https://orcid.org/0000-0003-3515-5793>

Quintiliano Angulo Córdoba

Universidad Juárez
Autónoma de Tabasco
División Académica de
Ciencias Básicas
Cunduacán Tabasco, México
<https://orcid.org/0000-0002-9594-6311>

Marian Cristina Ricárdez Torres

Universidad Juárez
Autónoma de Tabasco
División Académica de
Ciencias Básicas
Cunduacán Tabasco, México

Omar Morales Alejos

Universidad Juárez
Autónoma de Tabasco
División Académica de
Ciencias Básicas
Cunduacán Tabasco, México

Israel Benjamín Sánchez Jiménez

Universidad Juárez
Autónoma de Tabasco
División Académica de
Ciencias Básicas
Cunduacán Tabasco, México

José Adán Hernández Nolasco

Universidad Juárez
Autónoma de Tabasco
División Académica de Ciencias y
Tecnologías de la Información
Cunduacán Tabasco, México
<https://orcid.org/0000-0003-4671-0350>

RESUMEN: El objetivo de este trabajo fue determinar el modelo matemático de difracción en las regiones de Fresnel convergente y divergente de un doblete cementado, utilizando el método de propagación del espectro angular. Se obtuvieron modelos de difracción mediante la convolución de transformadas de Fourier, con una distribución tipo Bessel de la suma de argumentos, asociada a la distribución de amplitud del campo de ondas de luz láser difractadas por dos aberturas circulares de radios diferentes. Los resultados teóricos fueron corroborados experimentalmente y mediante simulación computacional. Se concluyó que la suma de los argumentos permite interpretar el patrón de difracción como franjas de interferencia elípticas con distribución tipo Bessel. Además, el desfase

que experimentan las ondas difractadas al propagarse desde el plano objeto hasta la región de Fresnel convergente es de $\pi/4$, mientras que, al llegar a la región de Fresnel divergente del lente doblete cementado usado como lente transformador, el desfase es de $3/4 \pi$.

PALABRAS CLAVE: Difracción. Convolución. Fresnel convergente y divergente. Simulación computacional.

MATHEMATICAL MODEL OF DIFFRACTION IN CONVERGENT AND DIVERGENT FRESNEL REGION OF A SPHERICAL LENS

ABSTRACT: The objective of this work was to determine the mathematical model of diffraction in the convergent and divergent Fresnel regions of a cemented doublet, employing the angular spectrum propagation method. Diffraction models were derived through the convolution of Fourier transforms, with a Bessel-type distribution of the sum of arguments, associated with the amplitude distribution of the laser light wave field diffracted by two circular apertures of differing radii. Theoretical results were corroborated both experimentally and through computational simulation. It was concluded that the summation of the arguments enables the interpretation of the diffraction pattern as elliptical interference fringes with a Bessel-type distribution. Furthermore, the phase shift experienced by the diffracted waves as they propagate from the object plane to the convergent Fresnel region is $\pi/4$, while upon reaching the divergent Fresnel region of the cemented doublet lens used as a transforming lens, the phase shift is $3 \pi/4$.

KEYWORDS: Diffraction. Convolution. Convergent and divergent Fresnel. Computational simulation.

1 INTRODUCCIÓN

El problema de difracción de luz coherente puede ser interpretado como el mapeo de la distribución de amplitud del campo óptico en algunas regiones del espacio, asociado a este problema existe la necesidad de describir la distribución de amplitud caracterizada por la función de transmitancia $t(x, y)$ asociada a la abertura u objeto difractor en planos de la región convergente, divergente y focal de una lente esférica (Martínez *et al.*, 2001). (Sheppard & Hrynevych, 1992) realizaron el estudio de difracción por una abertura circular, en el que propusieron una generalización a la teoría de difracción de Fresnel, a través de una aproximación por variación paraboidal en vez de una variación binominal en los términos de fase en la ecuación. (Quintero *et al.*, 2006), estudiaron los efectos de difracción e interferencia producidos por una estructura compuesta de múltiples aberturas circulares idénticas, no reportan análisis de propagación, ni presentan un modelo matemático de difracción, ya que el trabajo lo realizaron sin el uso de lente transformadora.

(Zárate, 2011), realizó el estudio de propagación del campo difractado por dos aberturas de radios con igual magnitud, su análisis lo realizó hasta la región de Fraunhofer o de la transformada de Fourier, usando un doblete cementado como lente transformadora.

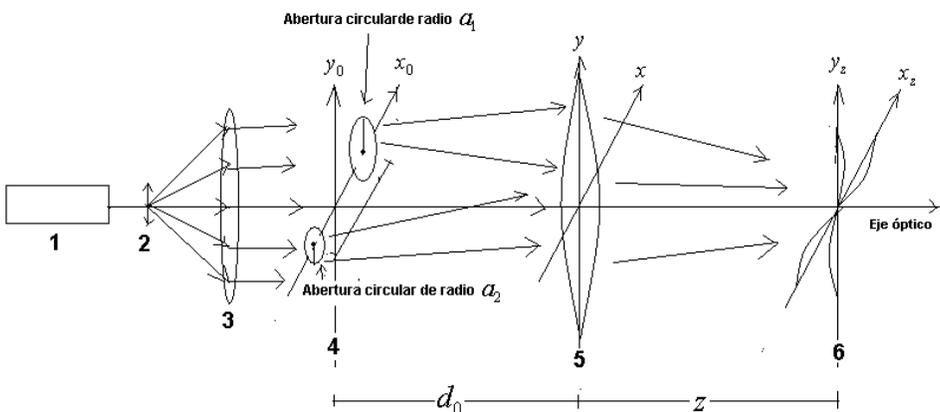
Mientras que (Zárate *et al.*, 2013), realizaron un análisis de propagación hasta el plano de enfoque o de Fraunhofer de un doblete cementado usado como transformador. además presentaron imágenes de patrones de difracción generados de forma experimental, en las cuales no se aprecia la geometría elíptica de las franjas de máxima y mínima intensidad, sin realizar un análisis de la propagación del campo de difracción hacia las regiones convergente y divergente de un lente doblete cementado usado como transformador.

En este trabajo, se reporta el estudio de propagación hasta la región de Fresnel convergente y divergente, de un lente doblete cementado del campo de difracción producido, por dos aberturas circulares con radios de diferente magnitud, contenidas en material laminado, iluminadas con ondas planas. El tratamiento se realizó bajo el formalismo del método de propagación del espectro angular.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

El modelo matemático de difracción fue generado de acuerdo con el arreglo de la figura 1. Centrando el análisis de propagación del campo difractado por las dos aberturas (figura 1,4) colocadas en el plano x_0, y_0 , de radios a_1 y a_2 de diferentes magnitudes iluminadas con ondas planas monocromáticas de amplitud constante E_0 . La función de transmitancia que se le asocia al par de aberturas como objeto difractor es, $t_0(x_0, y_0) = l_2 \text{circ}\left(\frac{r_0 - l_1}{a_1}\right) + l_2 \text{circ}\left(\frac{r_0 + l_1}{a_2}\right)$ (Goodman, 2005), siendo l_1 la distancia a la que se encuentran desplazadas las aberturas circulares, respecto al origen de coordenadas del plano objeto x_0, y_0 ver figura 1, cuyo espesor es l_2 y r_0 en coordenadas polares queda definido como $r_0 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2}$.

Figura 1. Procesador de Fourier usado para obtener patrones de difracción. Sobre la figura identificamos a: (1) laser de He-Ne, (2) filtro espacial, (3) colimador, (4) objeto bajo estudio en plano x_0, y_0 , (5) lente transformadora, y (6) plano de observación x_z, y_z .



El campo de ondas monocromáticas difractadas por el objeto o aberturas circulares desplazadas del origen en la cantidad l_1 , y distribuidas en el plano x_0, y_0 está dado por la ecuación (1).

$$E_1(x_0, y_0) = E_0 t_0(x_0, y_0) = E_0 \left[l_z \text{circ} \left(\frac{r_0 - l_1}{a_1} \right) + l_z \text{circ} \left(\frac{r_0 + l_1}{a_2} \right) \right] \quad (1)$$

(Andrés Zárata et al., 2013) determinaron que la distribución de amplitud del campo propagado hasta el plano x_z, y_z , en el que se distribuye, se obtiene mediante la ecuación (2), en la que se ha usado como condición inicial, que el objeto difractor esté colocado a la distancia d_0 , la cual es la misma que la longitud focal de la lente transformadora ($d_0 = f_{LD}$), además de considerar el teorema de la transformada de Fourier del producto de funciones (Gaskill, 1978).

$$G_z(u, v) = \frac{E_0 e^{ik[f_{LD} + z + n_{L1}\Delta_{L1} + n_{L2}\Delta_{L2}]} }{i\lambda f_{LD}} \left[\mathfrak{F}\{t_0(x_0, y_0)\} \otimes \mathfrak{F} \left\{ e^{\frac{ik}{2f_{LD}}(x_0^2 + y_0^2) \left(1 - \frac{z}{f_{LD}}\right)} \right\} \right]_{u = \frac{x_z}{\lambda f_{LD}}, v = \frac{y_z}{\lambda f_{LD}}} \quad (2)$$

La transformada de Fourier de la función de transmitancia $t_0(x_0, y_0)$ en la ecuación (2) se obtiene usando el teorema de linealidad, escalamiento y desplazamiento (Gaskill, 1978); siendo $\omega = \sqrt{u^2 + v^2}$ la frecuencia espacial definida en el plano de frecuencias espaciales uv , resultando

$$\mathfrak{F}\{t_0(x_0, y_0)\} = l_z \left[a_1^2 e^{-in_1 l_1 u} \left(\frac{J_1(2\pi a_1 \omega)}{\omega} \right) + a_2^2 e^{+in_2 l_2 u} \left(\frac{J_1(2\pi a_2 \omega)}{\omega} \right) \right] \quad (3)$$

En tanto que la transformada de Fourier de la Función exponencial de la ecuación (2) es:

$$\mathfrak{F} \left\{ e^{\frac{ik}{2f_{LD}}(x_0^2 + y_0^2) \left(1 - \frac{z}{f_{LD}}\right)} \right\} = \left(\frac{\lambda f_{LD}^2}{-i(f_{LD} - z)} \right) e^{-\frac{i\pi \lambda f_{LD}^2}{(f_{LD} - z)}(u^2 + v^2)} \quad (4)$$

Sustituyendo las ecuaciones (3) y (4) en la ecuación (2) se determina que la distribución de amplitud del campo difractado queda definida por la siguiente expresión:

$$G_{zC}(u, v) = e^{ik[f_{LD}+z+n_{L1}\Delta_{L1}+n_{L2}\Delta_{L2}]} \left(\frac{E_0 f_{LD}}{(f_{LD} - z)} \right) \bullet \left[l_z \left[a_1^2 e^{-i2\pi l_1 u} \left(\frac{J_1(2\pi a_1 \omega)}{\omega} \right) + a_2^2 e^{+i2\pi l_1 u} \left(\frac{J_1(2\pi a_2 \omega)}{\omega} \right) \right] \otimes e^{\frac{i\pi \lambda_{LD}^2}{(f_{LD}-z)}(u^2+v^2)} \right]_{u=\frac{x_z}{\lambda_{LD}}, v=\frac{y_z}{\lambda_{LD}}} \quad (5)$$

Donde el símbolo \otimes significa la operación matemática de convolución, mientras que el símbolo \bullet significa la operación de multiplicación en la ecuación (5) y en ecuaciones subsecuentes.

3 RESULTADOS TEÓRICOS

La ecuación (5) establece que, el patrón de difracción $G_{zC}(u, v)$ se ha propagado hasta la región de Fresnel (convergente) situada en el intervalo de distancia $0 < z < f_{LD}$, donde f_{LD} es la distancia focal de la lente transformadora (el cual se interpreta como un patrón de difracción derecho). Mediante el uso de la propiedad conmutativa de la convolución y a través de un proceso de integración la ecuación (5) se reescribe para esta región de Fresnel convergente en la forma dada por la ecuación (6). En esta ecuación, el desfaseamiento que ha sufrido el campo propagado desde el plano $x_0 y_0$ hasta el plano $x_z y_z$ en el intervalo arriba especificado, fue de $\pi/4$ el cual se obtiene realizando la integral de convolución de la ecuación (5) y considerando que $f_{LD} - z > 0$.

$$G_z(u, v) = \frac{2l_z E_0 e^{ik[f_{LD}+z+n_{L1}\Delta_{L1}+n_{L2}\Delta_{L2}]} e^{\frac{i\pi l_z^2 (f_{LD}-z)\cos^2 \phi}{\lambda_{LD}^2}} e^{-i\frac{\pi}{4}}}{\sqrt{\lambda(f_{LD} - z)}} \bullet \left[a_1^2 e^{-i2\pi l_1 u} \frac{J_1(2\pi a_1 \omega)}{\omega} + a_2^2 e^{i2\pi l_1 u} \frac{J_1(2\pi a_2 \omega)}{\omega} \right] \quad (6)$$

El patrón de difracción propagado hasta la región de Fresnel (divergente) de la lente transformadora, situada en el intervalo de distancia $f_{LD} < z < \infty$ se interpreta como un patrón de difracción izquierdo, quedando definido a través de la ecuación (7), el desfaseamiento en esta región fue de $3\pi/4$, mismo que se determina considerando que $z - f_{LD} < 0$ y realizando la integral de convolución de la ecuación (5).

$$G_z(u, v) = e^{ik[f_{LD}+z+n_{L1}\Delta_{L1}+n_{L2}\Delta_{L2}]} \left(\frac{2l_z E_0}{\sqrt{\lambda(z - f_{LD})}} \right) e^{-i\frac{3\pi}{4}} \bullet e^{\frac{i\pi l_z^2 (z-f_{LD})\cos^2 \phi}{\lambda_{LD}^2}} \left[a_1^2 e^{-i2\pi l_1 u} \frac{J_1(2\pi a_1 \omega)}{\omega} + a_2^2 e^{i2\pi l_1 u} \frac{J_1(2\pi a_2 \omega)}{\omega} \right] \quad (7)$$

Las distribuciones de intensidad para las regiones de Fresnel (convergente y divergente) de la lente transformadora, se determinan respectivamente por las ecuaciones (8) y (9).

$$I_z(u, v) = \left[\frac{2(E_0 I_z f_{LD})^2}{\lambda(f_{LD} - z)} \right] \cos(2\pi l_1 u) \left[(a_1^2)^2 \left[\frac{J_1(2\pi a_1 \omega)}{\omega} \right]^2 + \right. \\ \left. + 2a_1^2 a_2^2 \left[\frac{J_1(2\pi a_1 \omega)}{\omega} \right] \left[\frac{J_1(2\pi a_2 \omega)}{\omega} \right] + (a_2^2)^2 \left[\frac{J_1(2\pi a_2 \omega)}{\omega} \right]^2 \right] \quad (8)$$

$$I_z(u, v) = \left[\frac{2(E_0 I_z f_{LD})^2}{\lambda(z - f_{LD})} \right] \cos(2\pi l_1 u) \left[(a_1^2)^2 \left[\frac{J_1(2\pi a_1 \omega)}{\omega} \right]^2 + \right. \\ \left. + 2a_1^2 a_2^2 \left[\frac{J_1(2\pi a_1 \omega)}{\omega} \right] \left[\frac{J_1(2\pi a_2 \omega)}{\omega} \right] + (a_2^2)^2 \left[\frac{J_1(2\pi a_2 \omega)}{\omega} \right]^2 \right] \quad (9)$$

Usando la expresión (10) para el producto de funciones Bessel $J_1(2\pi a_1 \omega) J_1(2\pi a_2 \omega)$, (Hayek, 2001; Andrés Zárata, 2011); considerando que los productos de las funciones Bessel.

$$J_1(2\pi a_1 \omega) J_1(2\pi a_2 \omega) = \frac{(\pi a_1 \omega)(\pi a_2 \omega)}{(\pi a_1 \omega + \pi a_2 \omega)} * \\ [2J_0(2\pi a_1 \omega) J_1(2\pi a_2 \omega) + 2J_1(2\pi a_1 \omega) J_0(2\pi a_2 \omega)] \\ - \frac{(\pi a_1 \omega)(\pi a_2 \omega)}{(\pi a_1 \omega + \pi a_2 \omega)} [J_1(2\pi a_1 \omega + 2\pi a_2 \omega)] + \\ + \frac{(\pi a_1 \omega)(\pi a_2 \omega)}{(\pi a_1 \omega + \pi a_2 \omega)} \sum_{s=2}^{s=\infty} (-1)^s [J_s(2\pi a_1 \omega) J_{1+s}(2\pi a_2 \omega) + \\ + J_{1+s}(2\pi a_1 \omega) J_s(2\pi a_2 \omega)] \quad (10)$$

Definidos por la suma $\sum_{s=2}^{s=\infty} (-1)^s [J_s(2\pi a_1 \omega) J_{1+s}(2\pi a_2 \omega) + J_{1+s}(2\pi a_1 \omega) J_s(2\pi a_2 \omega)]$, no aportan información relevante a la distribución de intensidad por lo cual no se toman en cuenta y combinando la ecuación (10) con la ecuación (8), se obtiene que la distribución de intensidad en la región de Fresnel (convergente) de un lente doblete cementado o transformador es.

$$\begin{aligned}
I_z(u, v) = & \left[\frac{2(E_0 I_z f_{LD})^2}{\lambda(f_{LD} - z)} \right]^2 \left[\left(a_1^3 \right) \left[\frac{a_1 J_1(2\pi a_1 \omega)}{\omega} \right]^2 + \right. \\
& + 2a_1^2 a_2^2 \frac{(\pi a_1 \omega)(\pi a_2 \omega)}{(\pi a_1 \omega + \pi a_2 \omega)} \cos(4\pi l_1 u) \{ [2J_0(2\pi a_1 \omega) J_1(2\pi a_2 \omega)] + [2J_1(2\pi a_1 \omega) J_0(2\pi a_2 \omega)] \} - \\
& - 2a_1^2 a_2^2 \frac{(\pi a_1 \omega)(\pi a_2 \omega)}{(\pi a_1 \omega + \pi a_2 \omega)} \cos(4\pi l_1 u) \\
& \left. \bullet [J_1(2\pi a_1 \omega + 2\pi a_2 \omega)] + \left(a_2^3 \right) \left[\frac{a_2 J_1(2\pi a_2 \omega)}{\omega} \right]^2 \right] \quad (11)
\end{aligned}$$

La distribución de intensidad en la región de Fresnel (divergente) del doblete cementado o transformador, se determina considerando que la suma de funciones Bessel del párrafo anterior, en la ecuación (10) no aporta información relevante, bajo esta condición la ecuación (9) se reescribe en la forma:

$$\begin{aligned}
I_z(u, v) = & \left[\frac{2(E_0 I_z f_{LD})^2}{\lambda(z - f_{LD})} \right]^2 \left[\left(a_1^3 \right) \left[\frac{a_1 J_1(2\pi a_1 \omega)}{\omega} \right]^2 + \right. \\
& + 2a_1^2 a_2^2 \frac{(\pi a_1 \omega)(\pi a_2 \omega)}{(\pi a_1 \omega + \pi a_2 \omega)} \cos(4\pi l_1 u) \{ [2J_0(2\pi a_1 \omega) J_1(2\pi a_2 \omega)] + [2J_1(2\pi a_1 \omega) J_0(2\pi a_2 \omega)] \} - \\
& - 2a_1^2 a_2^2 \frac{(\pi a_1 \omega)(\pi a_2 \omega)}{(\pi a_1 \omega + \pi a_2 \omega)} \cos(4\pi l_1 u) \\
& \left. \bullet [J_1(2\pi a_1 \omega + 2\pi a_2 \omega)] + \left(a_2^3 \right) \left[\frac{a_2 J_1(2\pi a_2 \omega)}{\omega} \right]^2 \right] \quad (12)
\end{aligned}$$

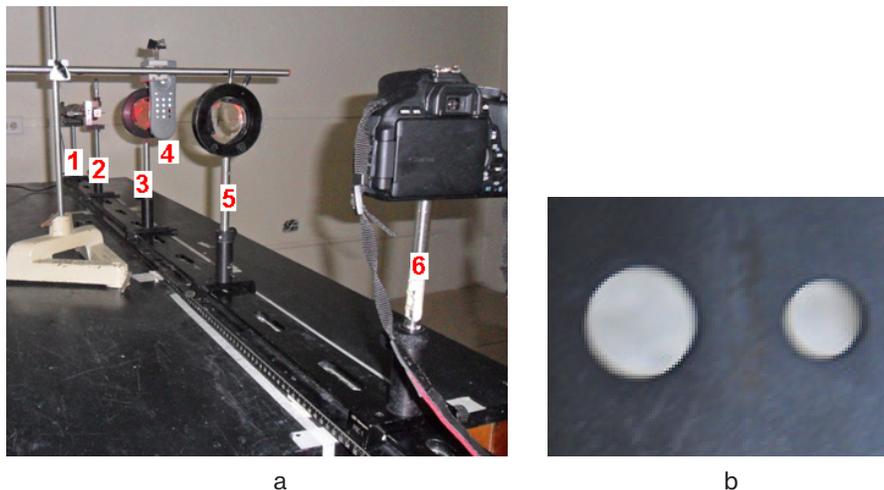
En la ecuación (11) la distribución del patrón de difracción que se propaga en la región de Fresnel (convergente) de la lente transformadora, difiere solo en el denominador de la distribución de intensidad definida con la ecuación (12) del patrón de difracción izquierdo que se propaga en la región de Fresnel (divergente) de la lente transformadora. Las ecuaciones (11) y (12) nos permiten afirmar que en las regiones de Fresnel convergente y divergente del lente doblete cementado usado como transformador, existe un patrón de difracción elíptico de distribución tipo Bessel con suma de argumentos, que modula franjas lineales de Young.

4 RESULTADOS EXPERIMENTALES

Los experimentos se desarrollaron empleando el sistema óptico de la Fig. 2a, el cual está en relación directa con el esquema de la Fig. 1. El haz de luz de láser de He-Ne ($\lambda = 632 \text{ nm}$) ampliado y filtrado con objetivo de microscopio 40X y pinhole de $50 \mu\text{m}$, fue

colimado con lente doblete cementado acromático de 50 *cm* de distancia focal. Como objeto difractor, se usaron dos aberturas circulares, su imagen se muestra en la Fig. 2b, cuyos radios de curvatura son: $a_1 = 1.0 \text{ mm}$ y $a_2 = 1.5 \text{ mm}$, respectivamente. Contenidas en material laminado de plástico con $l_z = 2.0 \text{ mm}$ de espesor. Se uso como transformador un doblete acromático cementado de 25 *cm* de distancia focal. Las imágenes de cada patrón de difracción en intensidad se grabaron usando una cámara digital de alta velocidad y precisión, con sensor CMOS y 18.0 megapíxeles.

Figura 2. a) Arreglo experimental, b) Aberturas con radios de diferente magnitud.



En la región de Fresnel convergente situada en el intervalo de distancia $0 < z < f_{LD}$ de la lente transformadora, se obtiene la convolución de transformadas de Fourier, cuantitativamente los podemos relacionar con los valores exactos dados por la ecuación (11) y se consideran patrones de difracción derechos. La Fig. 3. a, b y d muestran la distribución de intensidad, de los campos de difracción de convolución grabados a diferentes distancias, ver Tabla I, en la región de Fresnel convergente del doblete cementado, puede observarse que el patrón de difracción está formado por franjas elípticas con distribución tipo Bessel de suma de argumentos modulando franjas de Young, lo cual se hace más relevante en la imagen de la Fig. 3d.

Las imágenes de la Fig. 3c y 3e se consideran izquierdas y dan referencia del grabado de patrones de difracción en distribución de intensidad, en la zona de Fresnel divergente o de convolución de las transformada de Fourier, situada en el intervalo de distancias $f_{LD} < z < \infty$ de la lente transformadora; se observa que cada patrón contiene mínimos y máximos de irradiancia alternados, cuantitativamente se pueden relacionar con los valores exactos dados por la ecuación (12), además se ve que cada patrón de

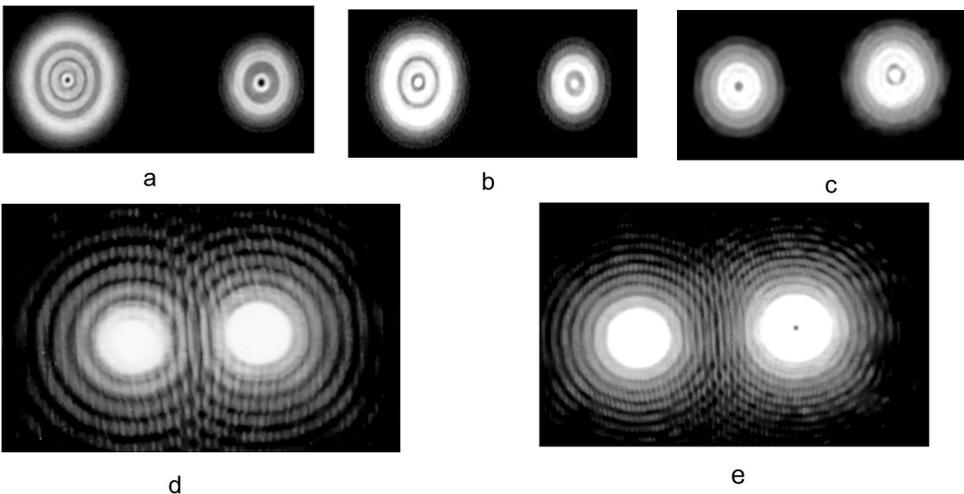
difracción está formado por franjas elípticas con distribución tipo Bessel de suma de argumentos, modulando franjas de Young.

Las imágenes de la Fig. 3, fueron generadas cuando los centros geométricos de las aberturas circulares Fig. 2, se orientaron paralelos al eje x_0 del plano objeto. Además, la Fig. 3a, muestra mínimos de irradiancia centrales en cada patrón, se establece que es más dominante la función de Bessel de orden uno en el producto con la función de Bessel de orden cero a la distancia $z=22\text{cm}$ de propagación. Mientras que a la distancia de propagación $z=23\text{cm}$ y $z=24\text{cm}$, la función de Bessel de orden cero es la dominante en el producto dando máximos centrales de difracción, ver Figs. 3b y 3d. También se observa que, conforme se acerca el plano de grabado a la distancia focal de 25cm de la lente transformadora los máximos centrales en cada patrón se amplifican Fig. 3d. Respecto a las imágenes de la Fig. 3c y 3e se consideran izquierdas, al ser grabadas en la zona de Fresnel divergente, en ellas se observa que cada patrón contiene mínimos y máximos de intensidad alternados en la región central.

Tabla I. Distancia objeto lente y lente plano de grabado, centros geométricos paralelos al eje x_0 .

Distancia lente objeto difractor d_0 .	Distancia lente plano de grabado z	Número de imagen
<i>25cm</i>	<i>22cm</i>	<i>3a</i>
<i>25cm</i>	<i>23cm</i>	<i>3b</i>
<i>25cm</i>	<i>48cm</i>	<i>3c</i>
<i>25cm</i>	<i>24cm</i>	<i>3d</i>
<i>25cm</i>	<i>35cm</i>	<i>3e</i>

Figura 3. a, b, c, d y e, patrones de difracción obtenidos experimentalmente grabados en la región de Fresnel convergente y divergente de un doblete cementado.



La Fig. 4a, 4b muestran la distribución de intensidad, de los campos de difracción de convolución grabados a diferentes distancias de la lente transformadora ver Tabla II, cuantitativamente los podemos relacionar con los valores exactos dados por la ecuación (11) y se consideran derechos, en la región de Fresnel (convergente) del doblete cementado, puede observarse que el patrón de difracción está formado por franjas elípticas con distribución tipo Bessel modulando franjas de Young. Las imágenes de la Fig. 4a y 4b, fueron generadas cuando los centros geométricos de las aberturas circulares figura 2, se orientaron paralelas al eje y_0 del plano objeto. La imagen de la Fig. 4a, muestra un máximo y un mínimo de irradiancia centrales en cada patrón, se establece que en el patrón superior es más dominante la función de Bessel de orden cero que la función de Bessel de orden uno, en el producto con la función de Bessel a la distancia $z=20cm$; mientras que en el patrón de difracción inferior es dominante la función de Bessel de orden uno más que la de orden cero en el producto de acuerdo con la ecuación (11). A la distancia de propagación $z=24cm$, la función de Bessel de orden cero es la dominante en el producto generando máximos centrales de difracción ver Fig. 4b. Se observa que conforme se acerca el plano de grabado a la distancia focal de la lente transformadora los máximos centrales en cada patrón de difracción se amplifican.

Mientras que la imagen del patrón de difracción de la Fig. 4c se considera izquierdo y fue grabada en la zona de Fresnel (divergente) o de convolución de la lente transformadora; se observa que cada patrón contiene mínimos y máximos de irradiancia alternados en su parte central, puede distinguir en la figura 4c, que el patrón de difracción está formado por franjas elípticas con distribución tipo Bessel modulando franjas de Young.

Figura 4. a), b), c) Patrones de difracción obtenidos experimentalmente y grabados en la región de Fresnel convergente y divergente del lente doblete cementado.

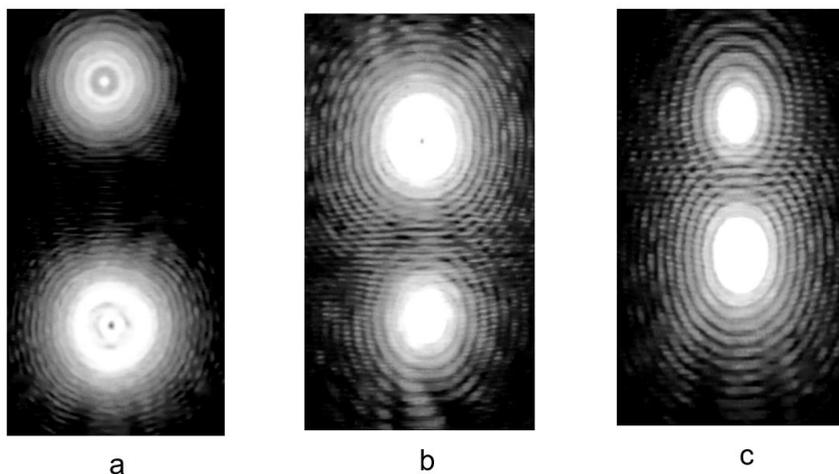


Tabla II. Distancia objeto lente y lente plano de grabado, centros geométricos paralelos al eje y_0 .

Distancia lente objeto difractor d_0 .	Distancia lente plano de grabado z .	Número de imagen
25cm	20cm	4a
25cm	23cm	4b
25cm	48cm	4c

5 SIMULACIÓN

La simulación computacional permite de una forma visual y práctica validar los resultados del modelo matemático de difracción, en este caso empleamos el método numérico “Beam Propagation Method”, que es una herramienta computacional ampliamente utilizada en óptica, y es una técnica numérica viable para el cálculo de haces ópticos en propagación libre, con pequeñas o nulas variaciones en el índice de refracción (Schmidt, 2010).

El algoritmo se implementó en el software matemático MatLab, para emular la propagación del haz laser de onda plana con longitud de onda de 632 nm , por dos aberturas circulares de radios de diferentes magnitudes de $a_1 = 1.0 \text{ mm}$ y $a_2 = 1.5 \text{ mm}$ respectivamente, tomadas como objeto difractor. Se construyo una malla de $60 \times 60 \text{ mm}$, considerando 975 muestras tanto para el eje x , como para el eje y . La distancia entre los centros de las dos aberturas es de 7 mm .

Una lente es un objeto de fase, para emular un doblete acromático y cementado, consideramos un retardo de fase entregado por una lente esférica perfecta convergente con una longitud focal de 25 cm . El objeto difractor se colocó a la distancia fija $d_0 = 25 \text{ cm}$, que es equivalente a la distancia focal frontal del doblete cementado. Los diferenciales en el eje de propagación z son $dz = 20 \text{ mm}$.

Para cada valor diferencial dz se obtuvo una gráfica de intensidad del haz óptico difractado, guardando las imágenes presentadas en la Fig. 5a, 5b, 5c, 5d y 5e correspondientes a las mismas distancias z a las que se tomaron las fotografías de la Fig. 3 en la parte experimental, ver Tabla I, dentro de la zona de Fresnel convergente; así como las del caso de la zona de Fresnel divergente del doblete cementado; además, para este caso de simulación también se consideró que los centros geométricos de las aberturas fueron orientados en el eje x_0 . Para el caso de los centros geométricos paralelos al eje y_0 se obtuvo una gráfica de intensidad del haz óptico difractado, guardando las imágenes simuladas, las cuales se muestran en la Fig. 6a, 6b y 6c, y corresponden a las mismas distancias z a la lente de acuerdo con la Tabla II, a las que se

tomaron las imágenes en la etapa experimental, tanto en la zona de Fresnel convergente y divergente del doblete cementado.

Figura 5. a, b, c, d y e. Gráficas de intensidad de un haz de luz, producidas grabadas mediante simulación computacional.

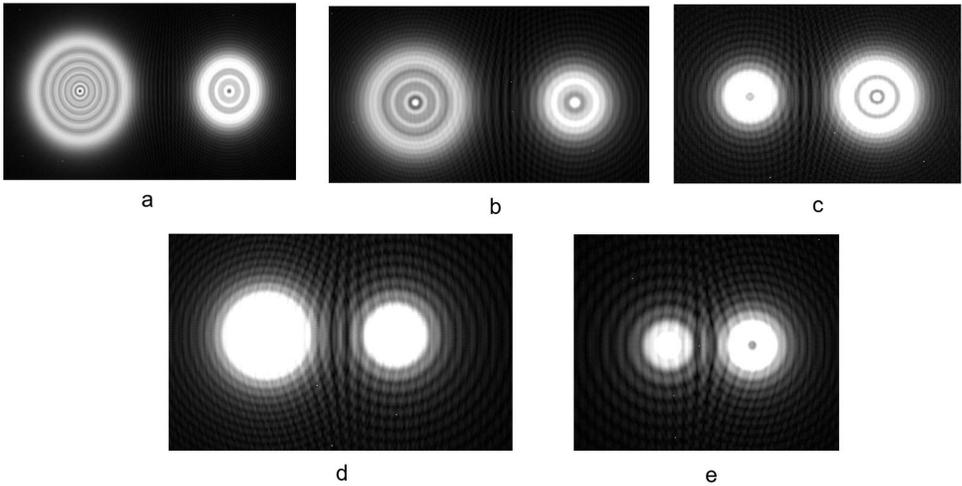
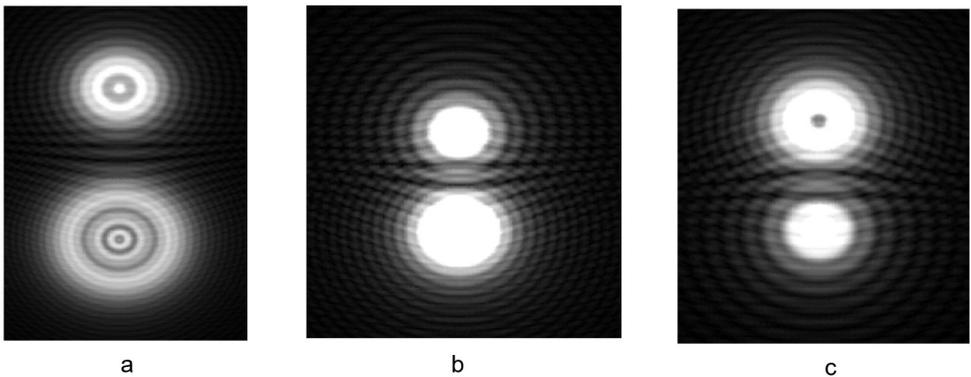


Figura 6. a, b y c. Graficas de intensidad de un haz de luz, producidas grabadas mediante simulación computacional.

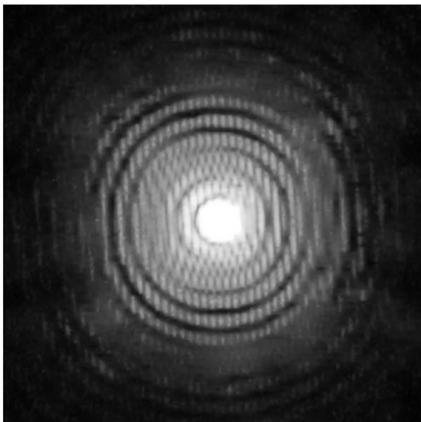


En lo que respecta a las imágenes de la Fig. 7a y 7b, ellas fueron producidas y grabadas de forma experimental en el plano focal, de Fraunhofer o de la transformada de Fourier, situado a la distancia $z=25\text{cm}$ de la lente doblete cementado o transformadora. La imagen de la Fig. 7a corresponde al patrón de difracción de franjas elípticas, producido por las dos aberturas circulares cuyos centros de curvatura estuvieron orientados en el eje x_0 del plano objeto, modulando franjas verticales de Young. Por la forma en que la lente hace converger la información, las franjas elípticas de máxima y mínima intensidad, quedan orientadas hacia el eje v en el espacio de frecuencias espaciales. La imagen de

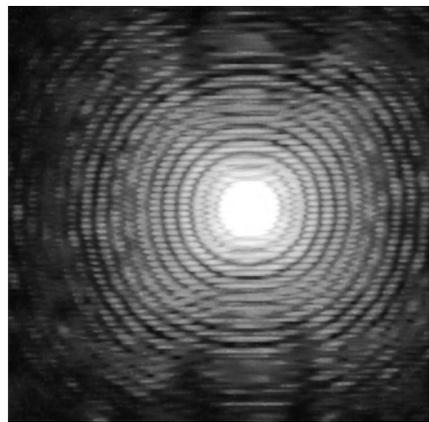
la Fig. 7b, muestra el patrón de difracción de transformada de Fourier, producido por el mismo par de aberturas circulares, con centros de curvatura paralelos ahora hacia el eje y_0 del plano objeto, en este caso las franjas elípticas están orientadas hacia el eje u en el espacio de frecuencias espaciales, también modulando franjas horizontales de Young.

En la Fig. 7. c) y d) se muestran los patrones de difracción simulados de transformada de Fourier, obtenidos en el plano focal o de Fraunhofer de la lente, las líneas de difracción de Young son bastante claras y bien definidas, y se aprecia su orientación horizontal y vertical. En tanto que las franjas de Bessel se distribuyen como las obtenidas de forma experimental ver Fig. 7a y 7b; es decir, las franjas de mínima y de máxima intensidad son elípticas, como lo predijeron Zárate *et al* (2013).

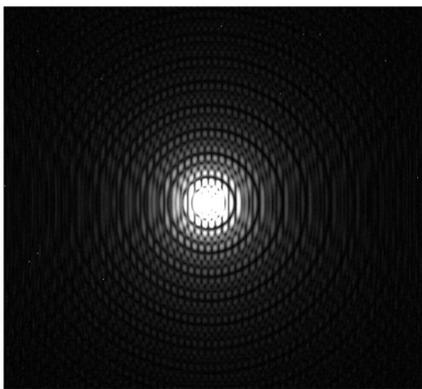
Figura 7 a, b. Patrones de difracción de transformada Fourier generados y grabados experimentalmente. Mientras que los de las figuras c y d, fueron generadas mediante simulación en computadora.



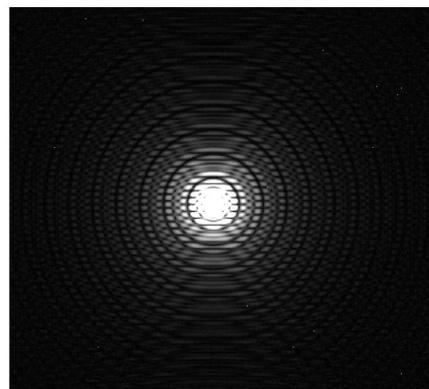
a



b



c



d

El Teorema de rotación publicado por Bracewell (2002), estableció que: Si una función $f(x, y)$ es rotada en el plano xy , entonces su transformada de Fourier $g(u, v)$ es rotada en el plano de frecuencias espaciales uv a través del mismo ángulo y en el mismo sentido. En base al teorema antes referido basta establecer que la transformada de Fourier es sensible a rotación, con lo cual se establece que los patrones de difracción mostrados en las Figs. 7a y 7b no son iguales, es decir, tienen distribución tipo Bessel y son de geometría elíptica, en el primer patrón de difracción el semieje mayor está en la dirección del eje de las frecuencias espaciales v , mientras que en el segundo patrón de difracción el semieje mayor está en la dirección de eje de frecuencias espaciales u , en base a que las aberturas circulares, ha sufrido una rotación de $\frac{\pi}{2}$ respecto del eje x_0 en el plano objeto.

6 CONCLUSIONES

Los modelos matemáticos de convolución de transformadas de Fourier ecuaciones (11) y (12), permiten establecer que las funciones de Bessel de orden uno son las dominantes en los productos para generar los mínimos de la figura 3a; mientras que las funciones de Bessel de orden cero son dominantes para generar los máximos de irradiancia central ver Figs. 3b, 3d y 4b. Por lo que se refiere a las Figs. 3c, 3e, 4a y 4c se observa que a las distancias que se grabaron ver Tablas 1 y 2, se alternan tanto la función de Bessel de orden uno, como la de orden cero en los productos, para producir de manera simultánea un mínimo y un máximo de irradiancia centrales.

Es de importancia documentar el desfase de $\frac{\pi}{4}$ que sufren las ondas difractadas, al propagarse desde el plano objeto hasta la zona de Fresnel convergente del doblete cementado usado como lente transformadora. Mientras que, al propagarse el campo difractado hasta la zona de Fresnel divergente de la lente transformadora, sufre un desfase de $\frac{3\pi}{4}$. Basta recordar que, Zárate *et al*, (2013) publicaron que el desfase de $\frac{\pi}{2}$ que sufrió el campo difractado al propagarse desde el plano objeto hasta el plano en la zona de Fraunhofer, de enfoque o de la transformada de Fourier de la lente transformadora. Esto permite concluir que el campo de difracción al propagarse se desfasa de acuerdo con la zona en el que se desea grabar su distribución de intensidad.

Se observa de la Figs. 4b y 4c que, conforme esté el plano de grabado o de Fresnel convergente o divergente, próximas al plano de enfoque o de Fraunhofer, también conocido como el plano de la transformada de Fourier, los resultados de tipo experimental mostrados, así como los mostrados en las Figs. 7a y 7b refuerzan, lo publicado por Zárate *et al*, (2013) en lo referente a las imágenes de transformada de Fourier, en ellas se hace evidente la forma elíptica del patrón de difracción.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andrés Zárate, E. (2011). *Estudio de Patrones de Difracción, en la Evaluación de Aberturas* [Tesis de doctorado]. INAOE.

Andrés Zárate, E., Angulo Córdova, Q., Hernández Nolasco, J. A., Gutiérrez Tepach, G., & Treviño Palacios, C. G. (2013). Elliptical Bessel-like Diffraction Pattern Produced by Circular Apertures with Different Radius. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 8785, 1-6.

Bracewell, R. N. (2002). *The Fourier transform and its applications*. McGraw Hill.

Gaskill, J. D. (1978). *Linear Systems, Fourier Transforms, and Optics*. John Wiley & Sons.

Goodman, J. W. (2005). *Introduction to Fourier Optics* (3.a ed.). McGraw Hill.

Hayek, S. I. (2001). *Advanced mathematica methods in science and engineering*. Marcel Dekker.

Martínez-Niconoff, G., Muñoz-Lopez, J., & Méndez-Martínez, E. (2001). Description of phase singularities and their application to focusing design. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, Image Science, and Vision*, 18(9), 2089-2094.

Quintero, O., Barrera, J. F., Henao, R., & Medina, F. F. (2006). Prevailing effects of interference or diffraction by multiple apertures. *Optics Communications*, 266(2), 558-561.

Schmidt, J. D. (2010). *Numerical simulation of optical wave propagation: With examples in MATLAB*. SPIE PRESS.

Sheppard, C. J. R., & Hrynevych, M. (1992). Diffraction by a circular aperture: A generalization of Fresnel diffraction theory. *JOSA A*, 9(2), 274-281.

CAPÍTULO 8

CARACTERIZACIÓN DE LOS EFECTOS DE UNA FULGURACIÓN SOLAR

Data de submissão: 20/11/2024

Data de aceite: 26/11/2024

Nicolas Quaglino

Tec. Facultad de Ciencias
Astronómicas y Geofísicas
Universidad Nacional de La Plata
La Plata, Pcia. de Buenos Aires
Argentina

Guillermo Daniel Rodriguez

Ing. en Electrónica
Grupo de Investigación y
Desarrollo en Radiofrecuencias e
Instrumentación (GIDRI)
Facultad de Ciencias
Astronómicas y Geofísicas
Universidad Nacional de La Plata
La Plata, Pcia. de Buenos Aires, Argentina

Ricardo Ezequiel Garcia

Ing. en Electrónica
Grupo de Investigación y
Desarrollo en Radiofrecuencias e
Instrumentación
Facultad de Ciencias
Astronómicas y Geofísicas
Universidad Nacional de La Plata
La Plata, Pcia. de Buenos Aires, Argentina

Leonardo José Navarría

Ing. en Electrónica
Grupo de Investigación y
Desarrollo en Radiofrecuencias e
Instrumentación
Facultad de Ciencias
Astronómicas y Geofísicas
Universidad Nacional de La Plata
La Plata Pcia. de Buenos Aires, Argentina

RESUMEN: Se presenta en este trabajo, un análisis sobre la posibilidad que ofrecen herramientas simples y de bajo costo, para el estudio de fenómenos de climatología espacial. Se desarrolla, a modo de ejemplo, el análisis de una fulguración solar ocurrida el día 11 de Marzo de 2015, la cual fue caracterizado por la National Aeronautics and Space Administration de los Estados Unidos (NASA) como un evento X2,2. Se evalúan los efectos de la misma en las diferentes capas ionosféricas y los efectos sobre el campo magnético terrestre a nivel de superficie a través del análisis de las mediciones efectuadas con instrumental instalado en la República Argentina. Se emplean datos provenientes de los siguientes instrumentos: riómetro cenital, riómetro de imágenes (imaging riometer), magnetómetros tipo Flux Gate y de precesión protónica y finalmente sondadores ionosféricos (ionosondas).

PALABRAS CLAVE: Riómetro. Ionosonda. Fulguración. Sol. Magnetómetro. Climatología. Espacial.

CHARACTERIZATION OF THE EFFECTS OF A SOLAR FLARE

ABSTRACT: We present in this work, an analysis of the possibilities that simple and inexpensive tools offer to study space weather. We deploy here an example analyzing a flare that occurred on 03/11/2015, that reached an X2.2 intensity (by Solar Dynamic Observatory, NASA, USA). The effects of this phenomenon at several ionospheric layers and on the surface geomagnetic field, through the analysis of measurements made with instruments placed at Republica Argentina. We employ data provided by: An cenital riometer and an Imaging riometer, ionosondes, protonic precesion magnetometer and flux gate magnetometers.

KEYWORDS: Riometer. Ionosonde. Flare. Sun. Magnetometer. Space. Weather.

1 INTRODUCCION

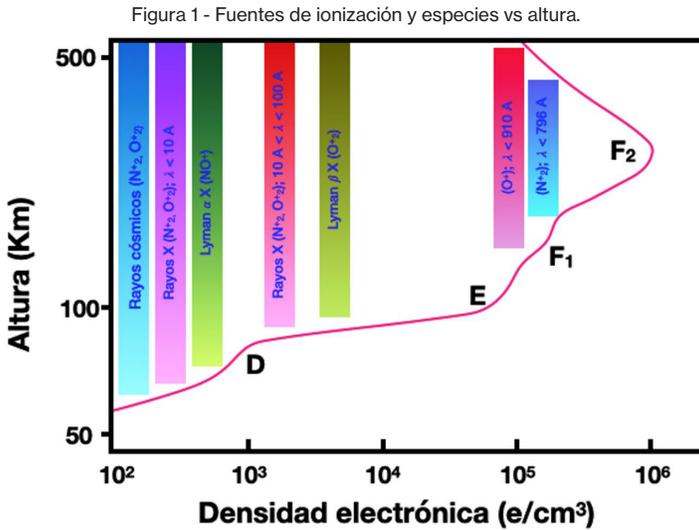
Existe dentro de lo que llamamos atmósfera terrestre, una región denominada ionósfera, ubicada entre los 60 y los 1000 km, la cual está compuesta por un plasma (el cuarto estado de la materia).

Este plasma que la conforma se caracteriza de acuerdo a la densidad de partículas con carga eléctrica (iones y electrones) con la altura. Este perfil de densidad presenta una estratificación en capas, denominadas D, E y F (F_1 y F_2) que debe su origen a la variación en la composición de especies atómicas con la altura y la penetración de los agentes ionizantes, situación que provoca la mencionada estratificación.

La capa E se caracteriza por encontrarse a una altura entre los 90 y los 130 km aproximadamente con preponderancia de iones N_2 , O_2 , O y NO, pudiendo también poseer iones metálicos de origen meteorítico. La capa D es la más baja de la ionósfera ubicándose entre los 60 y los 90 km y se puede considerar la porción más compleja de la ionósfera por la gran variedad de especies atómicas que posee y que están sometidas a alta presión comparada con otras capas pudiéndose encontrar densidades electrónicas del orden de 10^3 cm^{-3} . Por otro lado los procesos de ionización de las capas D y E son dependientes de la latitud. Para bajas y medias latitudes existen dos fuentes de ionización, una fuente solar (radiación y partículas solares) y otra, los rayos cósmicos galácticos. En condiciones normales, la principal fuente de ionización por debajo de 65 km son los rayos cósmicos. A partir de alrededor de los 85 km la radiación Lyman- α se convierte en la principal fuente de foto-ionización de NO (1100-1300 Å), y por encima de este punto, la foto-ionización se debe a los rayos X con longitud de onda menores a los 100 Å y a la radiación ultravioleta con una longitud de onda menor a los 1030 Å. (Banks y Kockarts, 1973) (Figura 1).

En altas latitudes, a los procesos antes mencionados se le suman los de ionización por precipitación de partículas de alta energía desde la magnetósfera, en especial durante periodos geomagneticamente perturbados.

Diferentes técnicas de radio han sido utilizadas para el estudio de la ionósfera, cada una con sus distintos alcances. Así por ejemplo tenemos a los radares de dispersión incoherente, complejos y costosos equipos, que brindan la información más detallada o las ionosondas y riómetros que posibilitan estudios limitados (Hunsucker, 1991), pero con equipamiento más económico.



2 CARACTERÍSTICAS DE DETECCIÓN SEGUN TIPO DE INSTRUMENTO

Como ya se estableció, la ionosfera depende fuertemente de los fenómenos solares tales como eyecciones de masa coronal o fulguraciones, el análisis de su estado permite detectar y eventualmente caracterizar la ocurrencia de estos eventos de climatología espacial. Abordamos entonces aquí, a modo de ejemplificar el potencial de las herramientas mencionadas, el análisis de una fulguración solar ocurrida el día 11 de Marzo del año 2015, empleando datos obtenidos mediante ionosondas, riómetros y magnetómetros. La elección de la fecha, obedece a que la fulguración solar ocurrió en horas del mediodía local para América del Sur, permitiendo este hecho, la mayor sensibilidad en todo el instrumental empleado (figura 2). Se presenta en la figura 3, la distribución espacial del instrumental empleado.

Figura 2: Estimación de Absorción vs zona de afectación (spaceweather.com)

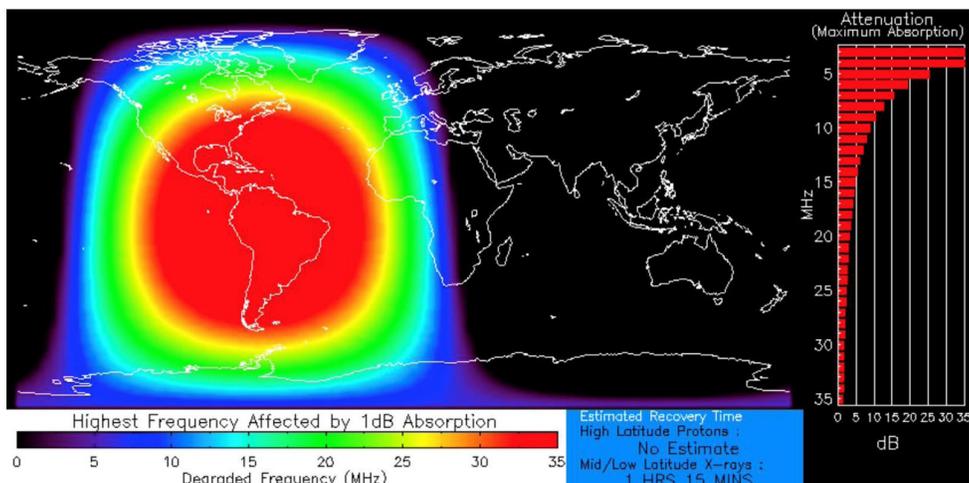


Figura 3 - Distribución geográfica del instrumental empleado.

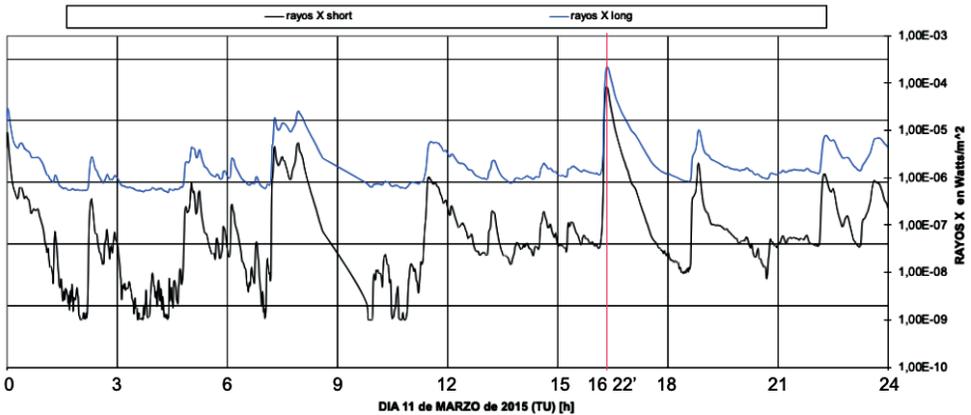


2.1 DATOS DE REFERENCIA

Se emplea como elemento de referencia, los datos de rayos X medidos por los sensores a bordo de los satélites GOES (NASA). Dicha red de satélites, orbita nuestro planeta por fuera de nuestra ionosfera, en órbitas geoestacionarias, a unos 35800 Km de

la superficie terrestre. El registro (figura 4), muestra el abrupto cambio en los niveles de rayos X, tanto largos como cortos (partes baja y alta del espectro de frecuencias para los rayos X), a las 16:22 del día 11/03/2015, siendo esta prueba fehaciente de que los efectos de una fulguración solar ha alcanzado al satélite en ese instante (y como máximo, la superficie terrestre 0,013 seg. después).

Figura 4 - Registro de rayos X cortos y largos en satélite GOES 15 el 11/03/2015.



2.2 IONOSONDA

Se utilizan datos de las ionosondas emplazadas en: la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la Universidad Nacional de La Plata, La Plata, provincia de Buenos Aires y en la Dirección de Investigación de la Armada (DIIV), Ciudad de Buenos Aires, Argentina. Dicho instrumento, es un radar que opera efectuando un barrido en el rango de frecuencias de 1 a 30 MHz, obteniendo el tiempo en el cuál retorna el eco de la señal, que es reflejada por la ionosfera, determinando así la altura a la cuál se produjo la reflexión. El hecho de emplear diferentes frecuencias, permite obtener ecos con diferentes densidades de carga, ya que para que se produzca esta reflexión, la condición necesaria es que:

$$f_{\text{señal}} \leq f_{\text{plasma}} = 8,98 \sqrt{N_e} \quad \text{Ecuación 1}$$

donde N_e es la densidad de electrones libres y la frecuencia del plasma, expresa la frecuencia natural de resonancia del plasma [Hargreaves, 1992].

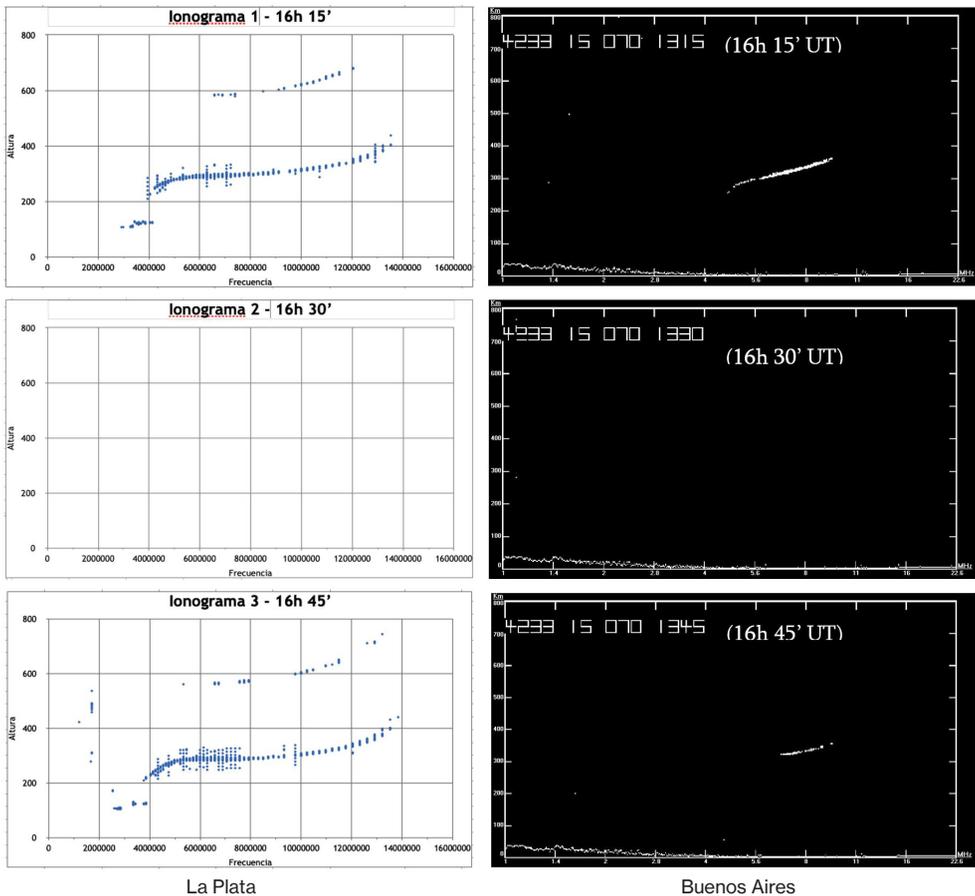
Por tanto, el resultado que ofrece este instrumento, denominado ionograma (figura 5), es un perfil de altura de reflexión vs frecuencia, hasta el máximo valor de densidades encontradas en ese instante. Cabe aclarar aquí que en este primer perfil, se considera en primera instancia que la onda electromagnética se propaga en el vacío, siendo entonces

c ($=3 \cdot 10^8$ m/s) su velocidad de propagación. dado que el medio atmosférico presenta un índice de refracción relativo diferente de 1 ($\eta_{\text{atmósfera}} \neq \eta_{\text{vacío}} = 1$), debe efectuarse a posteriori una corrección que considere este aspecto y hablamos entonces en el original de alturas *virtuales*. Este perfil con alturas *virtuales* nos permite obtener, mediante la ecuación 2, y la corrección de alturas mencionada, el perfil deseado de densidades de carga vs la altura.

Para nuestra fecha de interés, los instrumentos se encontraban configurados para realizar sondeos cada 15 minutos. Puesto que el evento ocurrió a las 16:22, el ionograma más cercano es el de las 16:30. Se muestran entonces en la figura 5, los ionogramas correspondientes a las 16:15, 16:30 y 16:45.

Allí se observa que los ionogramas 1 y 3, no presentan diferencias sustanciales en el comportamiento de la ionosfera, en tanto que el ionograma 2 no presenta traza.

Figura 5 - Ionogramas a la hora del evento solar.



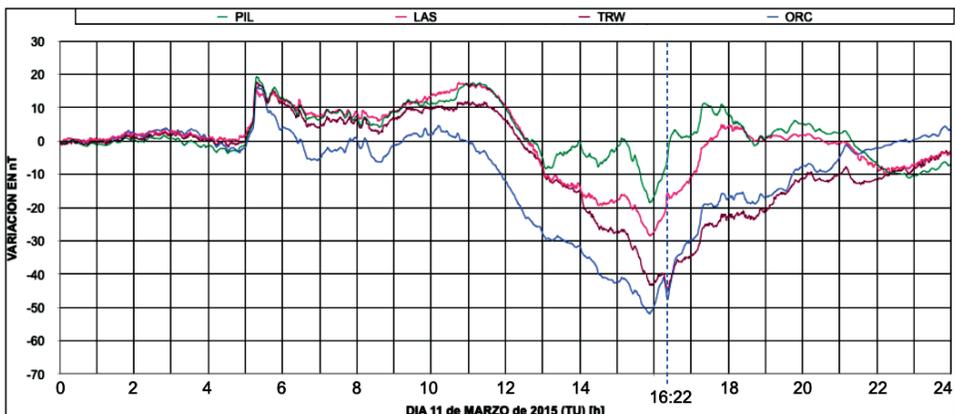
La explicación de este fenómeno es la siguiente: a las 16:15, la ionosfera se encuentra normal y se obtiene el producto esperado (ionograma) con el perfil ionosférico típico de la hora y la estación. El arribo de rayos X de gran intensidad ocurre a las 16:22, generando fundamentalmente un incremento notorio de cargas libres en la capa D.

La situación allí, es que a esa altura existe por defecto una gran densidad de moléculas, y al crecer mucho la densidad de cargas, se incrementa notoriamente la frecuencia de colisión entre partículas. Debido a esta alta densidad de colisiones, las ondas provenientes del radar, son absorbidas, en lugar de atravesar esa región y producir una reflexión a mayores alturas como ocurre en las condiciones normales, dando lugar al ionograma 2, en el cual no se registra eco. Para las 16:45, la situación de la capa D ya es prácticamente normal nuevamente, dando un ionograma semejante al 1.

2.3 MAGNETOMETROS

Se emplean datos de magnetómetros ubicados en la República Argentina, particularmente los de: Islas Orcadas (Atlántico Sur), Trelew (Pcia. de Chubut), Las Acacias (Pcia. de Buenos Aires) y Pilar (Pcia. de Córdoba). La relación entre una fulguración solar y el campo magnético terrestre, radica en el hecho de que la primera, como ya se estableció, incrementa la densidad de electrones libres en la ionosfera, por tanto, las corrientes ionosféricas, que aportan una componente del campo magnético terrestre total (CMTT), también se incrementan y por lo tanto el CMTT se ve afectado. Dependiendo del sentido de las corrientes en el lugar bajo estudio, el CMTT se incrementará o decrecerá por un breve período de tiempo (Yamazaki & Maute, 2016) registrándose en los magnetogramas, denominado usualmente “crochet” como se muestra en la figura 6, para el evento analizado.

Figura 6 - Magnetogramas de las estaciones Pilar (PIL), Las Acacias (LAS), Trelew (TRW) e Islas Orcadas (ORC) para el 11/03/2015 e influencia de la fulguración a las 16:22 TU.



2.4 RIOMETROS

Un Riómetro (riometer: Radio Ionospheric Opacity Meter Extra Terrestrial Electromagnetic Radiation) es un receptor de radio, que hace un uso oportuno de señales provenientes del espacio exterior, y cuyas fuentes emiten de manera muy estable en términos de frecuencia y potencia. Dado que existe una mayor cantidad de fuentes en la dirección al centro de la galaxia y a que respecto de este, la tierra realiza un giro sobre si misma cada 23:56 (24 horas sidéreas), se obtiene una curva característica con un máximo cuando el centro de la galaxia alcanza el punto mas proximo a la dirección del haz de la antena, usualmente el cenit. Se analiza entonces la variabilidad de la señal recibida en la superficie terrestre con respecto a una curva de referencia correspondiente a una ionosfera no perturbada, siendo dichas variaciones producto de los fenómenos de absorción desarrollados en la ionosfera, dependientes del estado de ionización de la misma.

Son utilizados principalmente para el estudio de la baja ionósfera, esto es de la capa D, ya que cuando una onda electromagnética atraviesa la esta capa sufre una atenuación, la cual es posible determinar aplicando la formula de Appleton-Hartree (Davies, 1990).

$$A = 4,6 \cdot 10^{-5} \int \frac{N_e v}{v^2 + (\omega \pm \omega_H \cos \theta)^2} dl \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde A es la atenuación en decibeles, N_e es la densidad electrónica, v es la frecuencia de colisión entre electrones y partículas neutras, ω la frecuencia angular de la onda electromagnética, ω_H la frecuencia de giro en la dirección de propagación, el ángulo entre la perpendicular del campo magnético y la dirección de propagación y dl el diferencial de camino recorrido por la onda.

La mejor ventana para observar el ruido cósmico en superficie corresponde al rango entre los 20 y 200 MHz optándose en general por mediciones alrededor de los 30 MHz. Los riómetros empleados en este caso, operan en 38,2 MHz.

Un receptor midiendo dicho ruido y apuntando siempre en la dirección cenital, realizará por la rotación de la tierra, un barrido completo del espacio circundante obteniendo una curva de variación de intensidad en un día sidéreo. En días no perturbados, se registran curvas de absorción mínima, de los cuales estadísticamente se obtiene la Curva de Día Quieto (Quiet Day Curve QDC) (Moro et al., 2012) que es la curva de comparación para determinar cambios en la absorción debido a gradientes de densidad electrónica principalmente en la ionósfera baja.

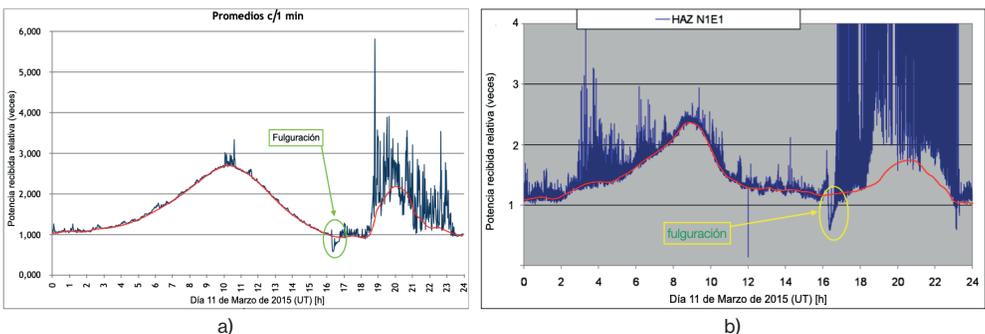
El riómetro en líneas generales trabaja como un radiómetro, midiéndose y registrándose la potencia de ruido cósmico recibida en una determinada frecuencia. Periódicamente se realiza una calibración del sistema conectándolo a una fuente calibrada de ruido.

2.4.1 RIOMETRO CENTAL SIMPLE

Los riómetros simples trabajan con una sola antena o a lo sumo un arreglo reducido de ellas observando siempre un mismo punto del cielo, midiéndose la radiación recibida por el ángulo de recepción de la antena, estudiándose la ionósfera baja interpuesta con el espacio y analizando las anomalías de absorción.

En este trabajo se emplean datos de un riómetro cenital que posee dos antenas dipolo de media longitud de onda en paralelo, lo que permite un haz cenital con ángulo de potencia mitad de 60° . Se muestra el resultado obtenido para el evento bajo estudio en la figuras 7a. Se detalla la amplitud de la señal recibido (en color azul) y el valor de la QDC obtenida mediante el método Tanaka (Moro et al, 2012), empleando los días quietos del mes correspondiente (en color rojo), Se puede observar como, a la hora del evento, disminuye notoriamente la potencia debido al incremento de absorción ionosférica.

Figura 7 - Respuesta del riómetro cenital a) y del haz N1E1 del 2D b) para el día 11/03/2015 y QDC correspondiente.



2.4.2 RIOMETRO DE IMAGEN (2D)

Los riómetros de dos dimensiones están conformados por arreglos de antenas por medio de las cuales es posible realizar el direccionado del haz y de esta forma poder determinar absorción en distintas direcciones del espacio. Con esto se consigue un barrido de distintas secciones del zenit obteniéndose un esquema de absorción en dos dimensiones. En este caso, se trata de un arreglo de 16 elementos de antena, de

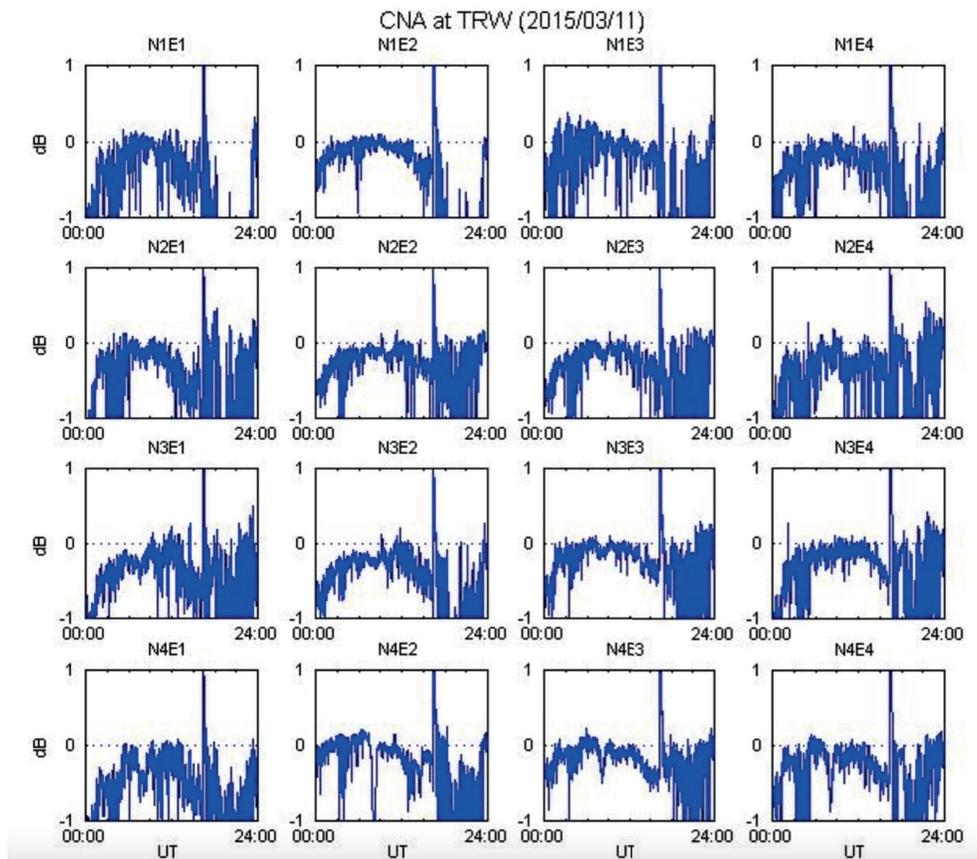
tipo dipolo de media longitud de onda, lo que permita la observación en 16 direcciones diferentes (16 haces) con ángulo de potencia mitad de 22° cada uno y denominados desde N1NE1 a N4E4 con las combinaciones intermedias. Se muestra en la figura 7b la respuesta del haz N1E1, en términos de potencia relativa para el día estudiado, la QDC correspondiente y se remarca la detección realizada del evento bajo estudio, como ya se evaluó para la respuesta del riometro cenital.

La figura 8 muestra el resultado en términos de la atenuación dada por la ecuación 2, aunque calculada mediante la relación entre las tensiones rms entre el dato del evento y el de la QDC y expresada en forma logarítmica, en dB obtenida para los 16 haces para el día 11 de marzo del 2015, quedando claramente determinado el instante en el cuál se produce la atenuación ionosférica de las ondas de radio, coincidente con la ocurrencia de la fulguración solar.

3 CONCLUSIONES

Se puede concluir entonces, en base a lo previamente expuesto, que dada la importancia que cobra para la sociedad actual, la climatología espacial, por los riesgos que conllevan, tanto para la tecnología como para las personas los eventos solares de gran magnitud, disponer de herramientas de bajo costo desplegadas en el territorio permitiría una mejor caracterización de estos eventos y de su influencia en cada región. Estas herramientas a su vez podrían servir, analizadas en conjunto y en tiempo real como un alerta climatologico propio de eventos de space weather severos.

Figura 8 - Atenuación registrada por el riometro 2D para el día 11/03/2015, destacándose el pico registrado a las 16:22 para las 16 direcciones de apuntamiento.



Se encuentra en proceso, la tarea de realizar un análisis exhaustivo con el objeto de caracterizar y correlacionar las amplitudes de los registros obtenidos por este instrumental, con la magnitud de los eventos de climatología espacial para obtener una mejor caracterización.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Banks, P.M., Kockarts, G. (1973). *Aeronomy*. Science Direct, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-10328-5>

Davies, K. (1990). *Ionospheric Radio*. Barnes & Noble. ISBN-10:086341186X, ISBN-13:9780863411861

Hargreaves, J. K. (1992). *The Solar-Terrestrial Environment: An Introduction to Geospace - the Science of the Terrestrial Upper Atmosphere, Ionosphere, and Magnetosphere*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511628924>

Hunsucker, R. D., & Hargreaves, J. K. (2003). *The high-latitude ionosphere and its effects on radio propagation*. Cambridge University Press.

Moro, J., Denardini, C. M., Correia, E., Abdu, M. A., Schuch, N. J., & Makita, K. (2012). A comparison of two different techniques for deriving the quiet day curve from SARINET riometer data. *Annales Geophysicae*, 30(8), 1159–1168. <https://doi.org/10.5194/angeo-30-1159-2012>

Yamazaki, Y., & Maute, A. (2017). Sq and EEJ – A Review on the Daily Variation of the Geomagnetic Field Caused by Ionospheric Dynamo Currents. *Space Science Reviews*, 206(1), 299–405. <https://doi.org/10.1007/s11214-016-0282-z>

SOBRE O ORGANIZADOR

Alireza Mohebi Ashtiani possui graduação em bacharelado em Matemática, Matemática Aplicada, pela Amirkabir University of Technology (Polytechnic of Tehran), Teerã/Irã (2003), mestrado em Matemática Aplicada pelo Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan/Irã (2005) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) na área de Automação (2012). Foi bolsista de Pós-doutorado Júnior do CNPq no Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica (IMECC/UNICAMP) e bolsista de Pós-doutorado da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) na Faculdade de Ciências Aplicadas da Universidade Estadual de Campinas (FCA/UNICAMP). Desde 2013 é docente vinculado ao Departamento Acadêmico de Matemática do Campus Londrina da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), e atualmente, docente permanente do Programa de Pós-Graduação em Matemática em Rede Nacional (PROFMAT) da UTFPR, Campus Cornélio Procopio.

Alireza Mohebi Ashtiani

<http://lattes.cnpq.br/5025709771742662>

ÍNDICE REMISSIVO

A

Agricultural land consolidation 56, 57, 58, 59, 61, 62, 63

B

Boundary conditions 64, 65, 69, 70, 72, 74, 80, 81

C

Climatología 100, 102, 109, 110

Convolución 85, 86, 89, 92, 94, 98

D

Danos 15, 16, 27

Deslizamentos 15, 16, 18, 19, 20, 21, 24

Difracción 85, 86, 87, 89, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99

E

Effective diffusivity 65, 66, 67, 69, 79, 82

Espacial 33, 39, 87, 88, 100, 102, 109, 110

F

Feições erosivas 1, 2, 7, 9, 10, 12, 13

Fresnel convergente y divergente 85, 86, 87, 91, 93, 94, 96

Fulguración 100, 102, 104, 106, 109

G

Geotecnia 13, 15, 26

H

Hollow spherical foods 65, 81

I

Inundação urbana 27, 38, 39

Ionosonda 100, 104

L

Land market 56, 57, 60, 61, 62

M

Magnetómetro 100

Mass diffusion 65

Mathematical model 64, 65, 66, 81, 86

Metodologia 7, 17, 27, 31, 36, 37, 50, 65

Movimentos de massa 1, 10, 11, 12, 15, 16, 18, 20, 23, 24

P

Paleocanais 47, 48, 50, 51, 52, 53, 54

Q

Quaternário 47, 48, 50, 52, 53, 54

R

Rent regulation 56

Republic of Kalmykia 56, 61, 63

Riometro 100, 107, 108, 109, 110

Risco 5, 7, 20, 26, 27, 28, 30, 33, 36, 38, 39, 40, 41, 42, 45

Riscos geológicos 15

Russia 56, 57, 58, 59, 62, 63

S

Simulación computacional 85, 86, 95, 96

Sísmica de alta resolução 47

Sol 100

U

Uso e ocupação do solo 1, 10, 11, 36

V

Variações Eustáticas 47, 48, 49, 52, 53, 54