



FACULDADE DE LETRAS E CIÊNCIAS SOCIAIS

DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA

Trabalho de Licenciatura

## Avaliação da Erosão Hídrica Actual e Potencial do Solo no Distrito de Changara

Paulo Joaquim Júnior Mate

Maputo, 2024

Paulo Joaquim Júnior Mate

**Avaliação da Erosão Hídrica Actual e Potencial do Solo no Distrito de Changara**

Monografia apresentada à Faculdade de Letras e Ciências Sociais, Departamento de Geografia, como requisito parcial para a obtenção do grau de Licenciatura em Geografia.

**Supervisor:** Mestre Paulo Covele

| Oponente | Presidente do Júri | Supervisor | Data            |
|----------|--------------------|------------|-----------------|
| _____    | _____              | _____      | ___ / ___ / ___ |

**i. DECLARAÇÃO DE HONRA**

Eu Paulo Joaquim Júnior Mate, estudante de Geografia na Faculdade de Letras e Ciências Sociais (FLCS), da Universidade Estadual de Maringá (UEM), declaro por minha honra que esta dissertação nunca foi antes apresentada, na essência, para obtenção de qualquer grau, e que constitui o resultado da minha investigação pessoal, estando indicadas no texto e na bibliografia as fontes utilizadas.

---

Paulo Mate

## **ii. DEDICATÓRIA**

A Deus, que é o dono do passado, presente e futuro e a quem devo tudo na minha vida. Em especial aos meus pais, irmãs e familiares, que sempre estiveram ao meu lado me apoiando nos momentos bons e difíceis, que não foram poucos durante essa jornada. Aos amigos, colegas e professores da UEM que motivaram-me e contribuíram na realização dessa etapa da minha vida acadêmica.

### iii. RESUMO

A determinação de áreas susceptíveis à erosão hídrica é fundamental na tomada de decisões que envolvem actividades relacionadas ao uso do solo. Estas decisões passam por medidas que podem ser preventivas ou reactivas, no sentido de se evitar a perda e conservação do solo, resultados que permitem a actuação sobre o território na minimização deste fenómeno.

No Distrito de Changara, este fenómeno assume proporções alarmantes, com mais de 500 famílias vivendo em zonas de alto risco de desabamento devido à proximidade com ravinas, especialmente no posto administrativo de Luenha. Neste contexto, este trabalho pretende avaliar a distribuição espacial da erosão actual e potencial no Distrito de Changara, Província de Tete. A metodologia adoptada combina sensoramento remoto, SIG e trabalho de campo. Para o mapeamento da erosão actual foi aplicado o método SARCCUS sobre as imagens de satélite e para a erosão potencial foi usado o método de análise multicritério AHP através da integração de cinco factores determinantes (Uso e Cobertura da Terra, Solo, Declividade, Intensidade Pluviométrica e Densidade de Drenagem). Relativamente a erosão actual os resultados revelam que 19% da área total do distrito está afectada por processos erosivos actuais, com predominância de erosão laminar (9%), em sulco (6%), fluvial (3%) e ravinar (1%). Quanto a erosão potencial os resultados demonstraram que 22,3% do distrito apresenta alta e muito alta susceptibilidade à erosão hídrica. O uso e cobertura da terra emerge como o factor mais influente, actuando como modulador dos demais factores, especialmente em áreas de agricultura itinerante e solos sem cobertura vegetal. As localidades de Mazoe, Luenha-sede e Dzunga são as mais afectadas, tanto pela erosão actual como pelo potencial erosivo. A relação entre erosão actual e potencial permitiu identificar áreas prioritárias para intervenção, onde 34 mil hectares precisam de intervenções correctivas, áreas já erodidas, e 134 mil hectares requerem medidas preventivas em zonas de alta susceptibilidade. O estudo fornece uma base científica para a gestão do solo face à degradação do solo pela erosão hídrica em Changara, preenchendo a lacuna de informações e oferece subsídios para melhorias de medidas de conservação do solo no distrito.

**Palavras-chave:** Erosão Hídrica, Susceptibilidade Erosiva, Método SARCCUS, Análise Multicritério AHP, Sensoramento remoto, Sistemas de Informação Geográfica.

## **i. ABSTRACT**

The determination of areas susceptible to water erosion is fundamental in decision-making involving land use-related activities. These decisions involve preventive measures, aimed at avoiding soil loss and conservation, or reactive measures when current soil degradation is observed, results that allow action on the territory to minimize this phenomenon. In Changara district, this issue has reached alarming proportions, with over 500 families living in high-risk collapse zones due to proximity to gullies, especially in Luenha administrative post. In this context, this work evaluates the spatial distribution of current and potential water erosion in Changara district, Tete Province. The adopted methodology combines remote sensing, GIS, and fieldwork. The SARCCUS method was applied to satellite images for current erosion assessment and the AHP method for potential erosion through the integration of five determining factors (Land Use and Cover, Soil, Slope, Rainfall Intensity, and Drainage Density). The results reveal that 19% of the district's total area is affected by current erosive processes, with a predominance of sheet erosion (9%), rill erosion (6%), fluvial erosion (3%), and gully erosion (1%). The erosion potential assessment showed that 22.3% of the district presents high and very high susceptibility to water erosion. Land use and cover emerge as the most influential factor, acting as a modulator of other factors, especially in shifting agriculture areas and bare soils. The localities of Mazoe, Luenha-sede, and Dzunga emerge as the most affected, both by current erosion and erosive potential.

**Keywords:** Water Erosion; Erosion Susceptibility; SARCCUS Method; AHP Multicriteria Analysis; Remote Sensing; Geographic Information Systems.

## **ii. AGRADECIMENTOS**

A Deus pelo dom da vida e força para superar todos os obstáculos durante essa jornada, de tornar-me um licenciado em geografia com orientação em SIG, que hoje torna realidade.

À minha família, pilar fundamental desta conquista, expresso minha profunda gratidão. Em especial, às minhas irmãs Celeste Mate, que me proporcionou a oportunidade de estudar na capital, e Florencia Mate pelo constante apoio emocional e financeiro. Aos meus pais, pela educação e pelo incentivo incansável durante todo o percurso.

Aos meus colegas/amigos Filimone Antônio, Afonso Bernardino e Samaria Zita, que sempre estiveram ao meu lado, oferecendo atenção e apoio acadêmico, dia e noite, durante toda essa caminhada.

Expresso minha mais profunda gratidão ao Mestre. Paulo Covele, meu supervisor, que transcendeu o papel de orientador acadêmico. Sua mentoria constante e compromisso com a excelência foram fundamentais não apenas para a realização deste trabalho, mas para toda minha formação profissional e acadêmica. Seus ensinamentos, orientação e apoio incondicional moldaram significativamente minha trajetória universitária e continuarão a influenciar minha carreira futura e à Mestre Alice Zua Nunes, que não apenas compartilhou conhecimento, mas também sabedoria e inspiração ao longo do percurso.

A todos os familiares, amigos, colegas e professores da UEM que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste sonho, minha eterna gratidão. E a todos aqueles que, directa ou indirectamente, ofereceram seu apoio ao longo da minha jornada, saibam que os levo em meu coração, com a esperança de um dia poder retribuir todo o carinho e ajuda.

**A todos o meu Muito Obrigado!**

## Índice Geral

|            |                                                     |      |
|------------|-----------------------------------------------------|------|
| i.         | DECLARAÇÃO DE HONRA.....                            | i    |
| ii.        | DEDICATÓRIA.....                                    | ii   |
| iii.       | RESUMO.....                                         | iii  |
| iv.        | ABSTRACT.....                                       | iv   |
| v.         | AGRADECIMENTOS.....                                 | v    |
| vi.        | Índice de Figuras.....                              | viii |
| vii.       | Índice de Tabelas.....                              | ix   |
| I.         | INTRODUÇÃO.....                                     | 1    |
| 1.1.       | Introdução.....                                     | 1    |
| 1.2.       | Revisão Bibliográfica.....                          | 3    |
| 1.3.       | Problema de Estudo.....                             | 4    |
| 1.4.       | Hipóteses.....                                      | 4    |
| 1.5.       | Objectivos.....                                     | 5    |
| 1.6.       | Justificativa.....                                  | 5    |
| II.        | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....                          | 6    |
| 2.1.       | Erosão do Solo.....                                 | 6    |
| 2.1.1.     | Tipos de Erosão.....                                | 6    |
| 2.1.2.     | Factores determinante de Erosão Hídrica.....        | 8    |
| 2.1.3.     | Avaliação da Erosão Hídrica do Solo.....            | 11   |
| 2.1.3.1.   | Erosão Hídrica Actual.....                          | 11   |
| 2.1.3.2.   | Erosão Hídrica Potencial.....                       | 11   |
| 2.1.4.     | Modelos de Avaliação da Erosão Hídrica do Solo..... | 12   |
| 2.1.4.1.   | Métodos Directos.....                               | 12   |
| 2.1.4.2.   | Métodos Indirectos.....                             | 12   |
| 2.1.4.2.1. | Métodos Indirectos Qualitativos.....                | 12   |
| III.       | ÁREA DE ESTUDO.....                                 | 15   |
| 3.1.       | Localização geográfica.....                         | 15   |
| 3.2.       | Caracterização Física da área de estudo.....        | 15   |
| 3.2.1.     | Geologia.....                                       | 16   |
| 3.2.2.     | Relevo.....                                         | 16   |
| 3.2.3.     | Hidrografia.....                                    | 17   |
| 3.2.4.     | Clima.....                                          | 18   |
| 3.2.5.     | Solo.....                                           | 19   |
| 3.2.6.     | Uso e Cobertura da terra.....                       | 20   |
| IV.        | MATÉRIAS E MÉTODOS.....                             | 23   |
| 4.1.       | Materiais.....                                      | 23   |



|            |                                                                         |    |
|------------|-------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1.1.     | Levantamento Bibliográfico .....                                        | 23 |
| 4.1.2.     | Levantamento de Dados.....                                              | 23 |
| 4.2.       | Procedimentos Metodológico .....                                        | 24 |
| 4.2.1.     | Metodologia de Avaliação de Erosão Hídrica Actual.....                  | 25 |
| 4.2.2.     | Metodologia de Avaliação de Erosão Hídrica Potencial .....              | 28 |
| 4.2.2.1.   | Preparação dos Factores determinantes da erosão hídrica .....           | 28 |
| 4.2.2.2.   | Processamento dos Factores Determinantes da Erosão.....                 | 30 |
| 4.2.2.2.1. | Factor Uso e Cobertura do Solo .....                                    | 30 |
| 4.2.2.2.2. | Factor Intensidade Pluviométrica.....                                   | 32 |
| 4.2.2.2.3. | Factor Erodibilidade do Solo .....                                      | 33 |
| 4.2.2.2.4. | Factor Declividade .....                                                | 34 |
| 4.2.2.2.5. | Factor Densidade de Drenagem .....                                      | 35 |
| 4.2.2.3.   | Atribuição dos pesos pelo AHP .....                                     | 36 |
| 4.2.2.4.   | Integração dos Factores determinantes .....                             | 39 |
| V.         | RESULTADOS E DISCUSSÃO.....                                             | 40 |
| 5.1.       | Resultados .....                                                        | 40 |
| 5.1.1.     | Erosão Hídrica Actual em Changara .....                                 | 40 |
| 5.1.1.1.   | Distribuição espacial e Tipos de erosão hídrica Actual em Changara..... | 41 |
| 5.1.1.2.   | Distribuição espacial da erosão hídrica actual por localidade.....      | 41 |
| 5.1.2.     | Erosão Hídrica Potencial em Changara.....                               | 42 |
| 5.1.2.1.   | Erosão Hídrica Potencial por Factor Determinante em Changara .....      | 42 |
| 5.1.2.2.   | Integração dos Factores determinantes .....                             | 44 |
| 5.1.2.3.   | Distribuição espacial da erosão hídrica Potencial em Changara.....      | 45 |
| 5.1.2.4.   | Distribuição espacial da erosão hídrica Potencial por Localidade .....  | 46 |
| 5.2.       | Discussão dos Resultados .....                                          | 47 |
| 5.2.1.     | Erosão hídrica Actual em Changara.....                                  | 47 |
| 5.2.2.     | Erosão hídrica Potencial em Changara .....                              | 48 |
| 5.3.       | Relação entre a Erosão hídrica Actual e Potencial em Changara.....      | 50 |
| VI.        | CONCLUSÃO .....                                                         | 52 |
| 6.1.       | Conclusão.....                                                          | 52 |
| 6.2.       | Recomendações.....                                                      | 53 |
|            | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....                                         | 54 |
|            | Anexos .....                                                            | 59 |

### **iii. Índice de Figuras**

|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Mapa de Localização Geográfica da área de estudo.. .....            | 15 |
| Figura 2: Formação Geológica do distrito de Changara. ....                    | 16 |
| Figura 3: Relevo do distrito de Changara .....                                | 17 |
| Figura 4: Clima do Distrito de Changara .....                                 | 18 |
| Figura 5: Distribuição espacial do tipo de solos no Distrito de Changara..... | 20 |
| Figura 6: Uso e cobertura da terra Distrito de Changara .....                 | 21 |
| Figura 7: Erosão Hídrica Actual distrito de Changara .....                    | 40 |
| Figura 8: Resultados por Factor Determinante de Erosão Potencial. ....        | 42 |
| Figura 9: Erosão Hídrica Potencial com Factores Integrados.....               | 45 |
| Figura 10: Sobreposição entre a erosão hídrica Actual com Potencial. ....     | 50 |

#### **iv. Índice de Tabelas**

|                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1: Formação Geológica e Rochas dominantes do distrito de Changara. ....                    | 16 |
| Tabela 2: Principais tipo de solo do Distrito de Changara e suas Características.....             | 19 |
| Tabela 3: Fluxograma Geral dos procedimentos Metodológicos .....                                  | 22 |
| Tabela 4: Softwares utilizados para efectivação do presente estudo .....                          | 23 |
| Tabela 5: Descrição dos Dados .....                                                               | 24 |
| Tabela 6: Classificação da erosão hídrica actual.....                                             | 26 |
| Tabela 7: Processo de mapeamento. ....                                                            | 26 |
| Tabela 8: Classificação da Susceptibilidade a erosão hídrica. ....                                | 30 |
| Tabela 9: Susceptibilidade a erosão hídrica do solo segundo factor uso e cobertura da terra. .... | 31 |
| Tabela 10: Susceptibilidade a erosão hídrica do solo segundo factor I Pluviométrica. ....         | 33 |
| Tabela 11: Erodibilidade baseada nas características do solo do distrito de Changara. ....        | 34 |
| Tabela 12: Susceptibilidade a erosão hídrica do segundo factor declividade.....                   | 34 |
| Tabela 13: Susceptibilidade a erosão hídrica segundo factor densidade de drenagem.....            | 35 |
| Tabela 14: Escala de comparação pareada do método AHP .....                                       | 36 |
| Tabela 15: Matriz de comparação pareada normalizada e pesos dos factores determinantes..          | 37 |
| Tabela 16: Matriz de calculo da razão de consistência da matriz de comparação pareada.....        | 39 |
| Tabela 17: Índice Randómico em função da ordem da matriz.....                                     | 39 |
| Tabela 18: Distribuição espacial e tipo de erosão hídrica actual em Changara. ....                | 40 |
| Tabela 19: Classificação de cada factor determinante em classes de susceptibilidade.....          | 42 |
| Tabela 20: Erosão Hídrica Potencial Distrito de Changara e Por Localidade. ....                   | 45 |
| Tabela 21: Comparação lado a lado das áreas afectadas por erosão actual e potencial. ....         | 51 |

## Lista de Siglas e Abreviatura

---

|                  |                                                                             |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| <b>AHP</b>       | Processo de Hierarquia Analítica                                            |
| <b>CENACARTA</b> | Centro Nacional de Cartografia e Teledetecção                               |
| <b>DEM</b>       | Modelo Digital de Elevação                                                  |
| <b>DNG</b>       | Direcção Nacional de Geologia                                               |
| <b>FLCS</b>      | Faculdade de Letras e Ciências Sociais                                      |
| <b>IDW</b>       | IDW - Distância Inversa Ponderada                                           |
| <b>INE</b>       | Instituto Nacional de Estatística                                           |
| <b>INIA</b>      | Instituto Nacional de Investigação Agronómica                               |
| <b>MAE</b>       | Ministério da Administração Estatal                                         |
| <b>MEF</b>       | Ministério da Economia e Finanças                                           |
| <b>MICOA</b>     | Ministério para a Coordenação da Acção Ambiental                            |
| <b>MITADER</b>   | Ministério da Terra, Ambiente e Desenvolvimento Rural                       |
| <b>PNUD</b>      | Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento                           |
| <b>SARCCUS</b>   | Comissão Regional da África Austral para a Conservação e Utilização do Solo |
| <b>SIG</b>       | Sistemas de Informação Geográfica                                           |
| <b>SOTERSAF</b>  | Base de Dados de Solo e Terreno para a África Austral                       |
| <b>UEM</b>       | Universidade Eduardo Mondlane                                               |
| <b>UTM</b>       | Universal Transversal Mercator                                              |

---

## **I. INTRODUÇÃO**

### **1.1. Introdução**

A erosão hídrica é um fenómeno natural que tem sido ampliado pelas actividades humanas, representando uma ameaça significativa à sustentabilidade agrícola e ao desenvolvimento socioeconómico em muitas regiões do mundo (Morgan, 2005).

No Distrito de Changara, Província de Tete, este problema assume proporções alarmantes, com impactos directos nos meios de subsistência da população local (MEF & MITADER, 2015).

A situação da erosão hídrica no Distrito é expressiva, com algumas áreas já em estado irreversível (MICOA, 2007). Particularmente preocupante é a situação no posto administrativo de Luenha, sede do distrito, onde mais de 500 famílias vivem em zonas de alto risco de desabamento devido à proximidade com ravinas (Jornal da Noite, TV Miramar, 2023). Considerando que 80% da população depende da agricultura para sua subsistência (MAE, 2014), a perda do solo fértil devido à erosão hídrica representa uma ameaça directa à segurança alimentar e ao desenvolvimento socioeconómico da região.

Apesar da gravidade da situação, o conhecimento detalhado sobre a distribuição espacial e a relação entre factores físicos e antrópicos que influenciam a erosão hídrica em Changara permanecem limitados. O único mapeamento abrangente disponível, realizado por Wambeke em 1986, oferece apenas uma visão generalizada em escala nacional (1:2.000.000), insuficiente para uma gestão eficaz do problema a nível local. Estudos subsequentes, como o Plano de Acção do MICOA (2007) e o MEF & MITADER, (2015), não fornecem uma avaliação espacial detalhada e dos tipos de erosão hídrica actuante.

Diante deste cenário, o presente estudo tem por objectivo principal, avaliar a distribuição espacial da erosão hídrica actual e potencial no distrito de Changara. Para a concretização deste objectivo, foi adopta uma abordagem metodológica qualitativa que integra sensoramento

remoto, sistemas de informação geográfica e trabalho de campo, considerando factores como solo, topografia, clima, drenagem e uso da terra.

Os resultados deste estudo preencherão uma lacuna importante no conhecimento científico sobre a erosão hídrica em Changara e fornecerá informações cruciais sobre a dimensão espacial das áreas críticas. Isso permitirá a implementação de medidas que podem ser preventivas, no sentido de se evitar a perda e conservação do solo através da implementação de medidas de mitigação, ou reactivas quando se obtém a perda e degradação actual do solo, resultados que permitem a actuação imediata sobre o território na minimização deste fenómeno.

Este trabalho está estruturado em seis capítulos: após esta introdução é seguido pela revisão bibliográfica, definição do problema, hipóteses, objectivos e justificativa do estudo. No segundo capítulo, desenvolve-se a fundamentação teórica sobre a erosão do solo, abrangendo sua classificação, tipos de erosão hídrica e factores determinantes. O terceiro capítulo caracteriza a área de estudo, descrevendo a localização geográfica e os aspectos físicos do distrito de Changara. O quarto capítulo detalha os materiais e métodos usados no estudo, apresentando os procedimentos metodológicos para avaliação da erosão hídrica actual através do método SARCCUS e da erosão potencial pelo método AHP. No quinto capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos, avaliando a distribuição espacial da erosão hídrica actual e potencial no distrito, bem como sua relação. Por fim, o sexto capítulo traz as conclusões do estudo e recomendações para gestão e mitigação dos processos erosivos identificados.

## **1.2. Revisão Bibliográfica**

A ocorrência de erosão hídrica do solo no distrito de Changara, província de Tete, tem sido objecto de alguns estudos relevantes nas últimas décadas.

O primeiro trabalho abrangente foi realizado por Wambeke em 1986, que elaborou um mapa de risco de erosão para todo o território de Moçambique na escala 1:2.000.000. Neste estudo, foram considerados como principais factores de erosão, a erosividade da chuva, a erodibilidade do solo e a declividade do terreno. A metodologia baseio-se no modelo SLEMSA, obtendo resultados que classificaram o distrito de Changara como uma área de risco médio a alto de erosão (Wambeke, 1986).

Em 2007, o Ministério para a Coordenação da Acção Ambiental elaborou o Plano de Acção para a Prevenção e Controlo da Erosão de Solos 2008-2018. Este plano apresentou um levantamento da situação da erosão em todo o país, incluindo dados específicos para o distrito de Changara. Os factores locais identificados como os principais que influenciam a erosão, são os cursos dos rios, as chuvas e as actividades humanas. O plano classificou a situação de erosão em Changara como crítica e o tipo de erosão comum a ravinar (MICOA, 2007).

Mais recentemente, o MEF & MITADER, (2015) apresentam uma visão abrangente da erosão no distrito, revelando uma situação crítica. O estudo identifica áreas particularmente problemáticas ao longo das margens dos rios Zambeze e Luenha, apontando como principais factores a desflorestação, o sobre-pastoreio, a agricultura itinerante e a produção intensiva de carvão vegetal. Estas actividades humanas não sustentáveis resultam em impactos significativos, como a perda de fertilidade dos solos, assoreamento de rios, e a degradação de infra-estruturas. O MEF & MITADER, (2015) estabelece uma relação directa entre as práticas de uso da terra e a intensificação da erosão, recomendando medidas de controle e mitigação que incluem práticas de conservação do solo, reflorestamento e gestão sustentável dos recursos naturais.

### **1.3. Problema de Estudo**

A erosão hídrica do solo no distrito de Changara é um problema evidente que carece de uma avaliação actualizada e detalhada. O único mapeamento abrangente da região, foi realizado por Wambeke em 1986, na escala 1:2.000.000, que não oferece detalhes suficientes para compreender o contexto local. Além disso, a metodologia aplicada não inclui o factor uso e cobertura da terra, apontado pelo MEF & MITADER, (2015) como o de maior influência na susceptibilidade à erosão hídrica no distrito. O Plano de Acção do MICOA (2007) apresenta apenas observações limitadas em algumas áreas, sem fornecer uma visão holística ou um mapeamento detalhado. Estas lacunas impedem uma compreensão precisa da distribuição espacial, dos tipos de erosão e de como os factores influenciam a erosão actual e potencial no distrito, dificultando assim a implementação de medidas específicas de prevenção e mitigação da erosão hídrica em Changara.

Diante deste cenário, este estudo propõe preencher estas lacunas, fornecendo uma avaliação actualizada e detalhada da distribuição espacial da erosão hídrica actual e potencial no distrito de Changara, considerando os factores locais específicos, que inclui o uso e cobertura da terra, que influenciam estes processos erosivos.

### **1.4. Hipóteses**

**H1:** A distribuição espacial da erosão hídrica actual no distrito de Changara é significativamente influenciada pelo uso e cobertura da terra, com áreas de agricultura itinerante e desflorestação apresentando maiores níveis de erosão.

**H2:** As áreas de susceptibilidade alta à erosão hídrica potencial no distrito de Changara concentram-se em regiões com declives mais acentuados e solos mais erodíveis, independentemente do uso actual da terra.



## **1.5. Objectivos**

**Geral:** Avaliar a distribuição espacial da erosão hídrica actual e potencial no distrito de Changara.

**Específicos:**

- Mapear as áreas de ocorrência actual de erosão hídrica do solo no Distrito de Changara;
- Identificar os factores determinantes da erosão hídrica actual e potencial no distrito;
- Mapear as áreas de potencial erosivo com base nos factores determinantes identificados;
- Relacionar os padrões de erosão hídrica actual e potencial.

## **1.6. Justificativa**

A escolha do distrito de Changara para a avaliação da erosão hídrica do solo fundamenta-se na criticidade do fenómeno na região, com algumas áreas em estado irreversível (MEF & MITADER, 2015). A situação é particularmente alarmante no posto administrativo de Luenha, sede do distrito, onde mais de 500 famílias vivem em zonas de alto risco de desabamento devido à proximidade com ravinas (Jornal da Noite, TV Miramar, 2023). Este estudo é crucial tanto do ponto de vista científico quanto socioeconómico. Cientificamente, representa o primeiro estudo local e abrangente sobre a erosão hídrica actual e potencial no distrito, preenchendo uma lacuna significativa no conhecimento geográfico do fenómeno na região. A análise integrada dos factores físicos e humanos que influenciam a erosão contribuirá para o avanço da compreensão dos processos erosivos em contextos locais específicos, alinhando-se com os princípios fundamentais da Geografia Física (Goudie, 2013). Do ponto de vista socioeconómico, a relevância é ainda mais pronunciada. Considerando que 80% da população de Changara depende da agricultura para sua subsistência (MEF & MITADER, 2015), a perda da fertilidade causada pela erosão hídrica do solo representa uma ameaça directa à segurança

alimentar e aos meios de vida da população local. Morgan (2005) enfatiza que o mapeamento detalhado das áreas afectadas e susceptíveis à erosão é fundamental para promover a resiliência e o uso sustentável do solo.

Os resultados deste estudo poderão ser utilizados pela Coordenação da Acção Ambiental nacional, provincial e distrital para priorizar áreas de intervenção, medidas de conservação e orientar sobre áreas a serem evitadas para construção e desflorestação, conforme recomendado por (MICOA, 2007) em estudos similares.

Além disso, este trabalho poderá servir como base para a elaboração de um guia metodológico para avaliações futuras da erosão hídrica em áreas que enfrentam problemas semelhantes. Os resultados serão partilhados com o Governo Distrital de Changara, potencializando o seu impacto prático face a problemática da erosão hídrica do solo no Distrito de Changara.

## **II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1. Erosão do Solo**

Nkeshimana (2008) descreve a erosão como um processo bifásico, envolvendo a separação de partículas do solo e o seu subsequente transporte por agentes erosivos, nomeadamente água corrente e vento. Por outro lado, o MICOA (2007) define a erosão do solo como um processo de separação, remoção, transporte e deposição de partículas de solo causado pela influência da chuva e vento. Para Morgan (2005), a erosão do solo pode ser entendida como um processo insidioso, que ataca em primeiro lugar as camadas superficiais do solo, podendo causar posteriormente a diminuição da sua produtividade por períodos prolongados.

#### **2.1.1. Tipos de Erosão**

Lima (1987) explica que o processo erosivo requer um agente (água ou vento) e um material (solo) sobre o qual actua. Carvalho et al. (2006) classificam a erosão em dois grandes grupos: erosão natural (ou geológica) e erosão antrópica (ou acelerada). No entanto, a classificação

mais comum a erosão dos solos pode ser hídrica, quando o principal agente é a água ou pode ser eólica, quando o principal agente é o vento.

#### **2.1.1.1. Erosão Hídrica**

A erosão hídrica, foco deste trabalho por ser a mais evidente no Distrito de Changara (MEF & MITADER, 2015)), é definida por Cassol e Lima (2003) como um processo físico de desagregação, transporte e deposição das partículas do solo, causado pela acção da água das chuvas e do escoamento superficial.

#### **2.1.1.2. Tipos de Erosão Hídrica**

Segundo Marques (1992), Bertoni e Lombardi Neto (2012), e Pruski (2013), os tipos de erosão hídrica são classificados com base nas marcas deixadas na superfície do solo e no seu estágio de evolução:

**Erosão por Gota (Splash):** Pruski (2013) descreve-a como o primeiro passo da erosão dos solos, resultante do impacto directo das gotas de chuva nas partículas do solo, provocando turbulência que por sua vez permite uma grande capacidade de transporte de sedimentos. A energia das gotas faz com que os elementos estruturais do solo se desintegrem e as partículas arrancadas e espalhadas em todas direcções, essencialmente pelo declive abaixo.

**Erosão Laminar:** Carvalho e Diniz (2011) definem-na como uma forma de erosão que ocorre de maneira suave e aparentemente uniforme em toda a superfície do terreno pela acção das enxurradas não concentradas. Ainda de acordo com os autores, o movimento da camada delgada do solo sobre toda uma área chama-se erosão laminar. Este tipo de erosão remove as partículas do solo, a matéria orgânica e os nutrientes solúveis, o que cria sérios problemas para a manutenção da fertilidade e produtividade dos solos (Pruski, 2013).

**Erosão em Sulco:** de acordo com Carvalho & Diniz (2011) sulco é um corte pouco profundo no solo, que surge com a concentração da água em locais específicos com a formação de canais (sulcos). Os autores indicam que esse tipo de erosão resulta de pequenas irregularidades de

declive do terreno, fazendo com que as enxurradas se concentrem em alguns pontos específicos, atinja volume e velocidade suficiente para formar riscos mais ou menos profundos (inferior que 30 cm).

**Erosão em Ravinas:** É descrita por Carvalho e Diniz (2011) como o aprofundamento dos sulcos, podendo atingir vários metros de profundidade e comprimento. Os autores destacam ainda que este tipo de erosão ocorre quando grande concentração de enxurradas passa pelo mesmo sulco, causando a ampliação do mesmo, pelo aumento de deslocamento de grande quantidade de massas de solo, formando uma grande cavidade em extensão e profundidade. De acordo com Morgan (1996), as ravinas estão quase sempre associadas com a erosão acelerada, e por conseguinte, com a instabilidade do meio ambiente.

**Erosão Fluvial:** Schwab et al. (1981) definem-na como a remoção de solos nas margens dos cursos de água ou o movimento do solo dentro do canal. O autor, salienta que esta forma de erosão difere da erosão em ravinas principalmente porque os cursos de água têm quase sempre uma corrente contínua e um declive relativamente plano, enquanto que a erosão em ravinas ocorre em linhas de água intermitentes perto da extremidade superior das nascentes tributárias.

### **2.1.2. Factores determinante de Erosão Hídrica**

A erosão hídrica sofre a acção de diferentes factores, entre os quais segundo Morgan (2005) e MEF & MITADER, (2015) figuram principalmente: a precipitação, a topografia, o tipo do solo, densidade dos rios e, uso e cobertura da terra, de modo que cada factor tem sua maior ou menor contribuição.

**Precipitação:** A precipitação, em particular, é considerada um dos factores climáticos mais relevantes na erosão dos solos (Lima et al. 2023). A sua capacidade de causar erosão, denominada erosividade, é determinada pela intensidade, duração e frequência das chuvas. Bertoni e Neto (1999) enfatizam que a intensidade é o aspecto pluviométrico mais crítico no

processo erosivo, observando que quanto maior a intensidade da chuva, mais significativas são as perdas por erosão. Viana (2000) explica o mecanismo pelo qual a chuva provoca erosão. Quando as gotas de água atingem o solo desprotegido, ou mesmo com vegetação escassa, podem causar a desagregação das partículas do solo, dependendo da sua velocidade e intensidade. A água da chuva que não consegue infiltrar-se no solo acaba por transportar os sedimentos desagregados, contribuindo para o escoamento superficial.

**Solo:** A erodibilidade do solo é um conceito crucial na compreensão dos processos erosivos. Barros (2005) define-a como a susceptibilidade do solo à erosão superficial, onde as partículas do solo são desprendidas e transportadas pela acção do fluxo hídrico superficial concentrado. Fragassi (2001) e Marín (2005) corroboram esta definição, afirmando que a erodibilidade está intimamente associada aos processos de desagregação e transporte das partículas do solo. Bastos (2001) acrescenta que a erodibilidade reflecte a facilidade com que as partículas do solo são destacadas e transformadas. Um aspecto importante da erodibilidade é a sua relação com as propriedades físicas do solo. Esta propriedade é considerada uma das mais complexas do solo, devido ao grande número de variáveis que a influenciam (Lima, 2003). Ramidan (2003) destaca que a textura é a propriedade física mais significativa do solo no contexto da erodibilidade, devido à sua relativa estabilidade ao longo do tempo. O autor observa que solos com um teor de argila inferior a 30% tendem a ser mais susceptíveis ao impacto das gotas de chuva e, consequentemente, à erosão.

**Relevo:** A declividade do terreno desempenha um papel crucial na determinação da susceptibilidade do solo à erosão (Morgan, 2005). Phinzi e Ngetar (2019) salientam que este factor é fundamental por influenciar não só a erosão do solo, mas também outros processos geomorfológicos associados, como o transporte e a sedimentação resultantes da interacção entre precipitação e escoamento superficial.

É amplamente reconhecido na literatura científica que existe uma relação directa entre o grau de inclinação do terreno e a susceptibilidade do solo aos processos erosivos. Seutloali e Beckedahl (2015) corroboram esta noção, afirmando que quanto mais acentuada for a inclinação de uma área, maior será a sua susceptibilidade à erosão, e vice-versa.

**Uso e Cobertura da Terra:** Szilassi et al. (2006) afirmam que a intensidade da erosão varia significativamente dependendo dos diferentes tipos de cobertura do solo. Os autores ressaltam que áreas com solo exposto e vegetação escassa são particularmente vulneráveis à erosão. Além disso, áreas agrícolas e assentamentos humanos também apresentam impactos prejudiciais em processos erosivos.

As áreas agrícolas, dependendo das práticas de cultivo utilizadas, podem ser especialmente susceptíveis à erosão. O cultivo intensivo, a remoção da vegetação nativa e o uso inadequado do solo podem aumentar significativamente o risco de erosão (Szilassi et al., 2006). Por outro lado, práticas agrícolas conservacionistas, como o plantio directo e o uso de culturas de cobertura, podem ajudar a reduzir a erosão. Os assentamentos humanos, por sua vez, tendem a aumentar as áreas impermeáveis, alterando os padrões naturais de drenagem e ambientais acelerando o escoamento superficial (Viana, 2000). Isto pode levar a um aumento da erosão, especialmente nas áreas adjacentes aos assentamentos. A cobertura vegetal natural actua como uma defesa do solo contra a erosão (Viana, 2000). Bertoni e Neto (1999) descrevem vários efeitos protectores da vegetação. Ela oferece protecção directa contra o impacto das gotas de chuva, dispersa a água através da interceptação, aumenta a infiltração da água através dos canais formados pelas raízes, melhora a estrutura do solo e reduz a velocidade do escoamento superficial.

**Densidade de Drenagem:** A densidade de drenagem é um parâmetro hidrológico crucial na avaliação da susceptibilidade de uma área à erosão do solo (Ebhuoma et al., 2022). Este indicador fornece uma medida quantitativa da extensão total dos cursos de água numa

determinada área, incluindo córregos, rios e canais, em relação à superfície total dessa área. Esta relação pode ser explicada pela maior proximidade dos cursos de água às encostas e margens, o que intensifica os processos erosivos. A proximidade dos rios às laterais do terreno é particularmente relevante neste contexto, pois facilita o transporte rápido de sedimentos erodidos, aumenta a instabilidade das margens. (Ebhuoma et al., 2022).

### **2.1.3. Avaliação da Erosão Hídrica do Solo**

De acordo com Morgan (2005), A avaliação da erosão hídrica é um processo sistemático de colecta, análise e interpretação de dados para determinar a extensão, severidade e impacto da degradação do solo causada pela acção da água. O processo de avaliação da erosão hídrica do solo pode ser dividido em dois tipos: Erosão Hídrica Actual e Potencial.

#### **2.1.3.1. Erosão Hídrica Actual**

Segundo Morgan (2005), a Erosão Actual, também conhecida como erosão real ou efectiva, refere-se ao processo de manipulação do solo que ocorre no presente momento em uma determinada área. É o resultado visível e mensurável da perda de solo causada por agentes erosivos como água, vento, gelo ou actividades humanas. A erosão actual pode ser observada e quantificada através de observações por sensoriamento remoto, por imagens de satélites, fotografias aéreas, de drones ou por observação directa no campo.

#### **2.1.3.2. Erosão Hídrica Potencial**

A erosão Potencial também conhecida como risco de erosão, conforme apresentado por Julião et al. (2009), e Morgan (2005), refere-se à susceptibilidade inerente de uma área à erosão do solo, considerando factores físicos como (relevo, solo, precipitação, uso da terra,) que predis põem a área à ocorrência de certos processos erosivos. podendo ser avaliada duma forma qualitativa ou quantitativa através dos factores de predisposição para a ocorrência desse mesmo perigo (Julião et al., 2009).

#### **2.1.4. Modelos de Avaliação da Erosão Hídrica do Solo**

A avaliação da erosão hídrica do solo é realizada através de dois tipos principais de métodos: Directos e Indirectos Kachouri et al. (2014).

##### **2.1.4.1. Métodos Directos**

Os métodos directos de avaliação da erosão hídrica do solo baseiam-se em observações e medições de campo, oferecendo dados precisos e detalhados sobre parcelas específicas através de mapeamento minucioso (Evangelista, 1987). Suas principais vantagens são a alta precisão e o detalhamento local. Contudo, apresentam desvantagens significativas: são demorados, caros e impraticáveis para áreas extensas, além de não fornecerem uma visão global dos padrões erosivos. Estas limitações, apontadas por Lal (2008), tornam os métodos directos impraticáveis para aplicação em larga escala ou em regiões de difícil acesso.

##### **2.1.4.2. Métodos Indirectos**

Kachouri et al. (2014) sugerem que os métodos indirectos compreendem abordagens quantitativas e qualitativas, cuja aplicabilidade depende do objectivo específico do estudo.

###### **2.1.4.2.1. Métodos Indirectos Qualitativos**

Os métodos qualitativos, em particular, são abordagens subjectivas baseadas em opiniões de especialistas, que descrevem o zonamento da erosão em termos descritivos. Um subgrupo importante dos métodos qualitativos inclui as análises geomorfológicas e heurísticas (Kachouri et al. 2014).

**Método Indirecto Qualitativo Geomorfológico:** a ocorrência de erosão hídrica do solo é avaliada através de diversas técnicas. Estas incluem observações sobre o terreno, interpretação visual de fotografias aéreas, imagens de drones e imagens de satélite de alta resolução espacial (Covele, 2022). Esta abordagem permite uma avaliação menos dispendiosa de áreas extensas, superando algumas das limitações dos métodos directos. Esta metodologia é aplicada no presente estudo, utilizando o Modelo SARCCUS para a determinação da erosão Actual.



**Modelo SARCCUS:** O modelo SARCCUS (Southern African Regional Commission for the Conservation and Utilization of the Soil - Comissão Regional da África Austral para a Conservação e Utilização do Solo) é uma ferramenta eficaz para o mapeamento da erosão actual em grande escala, proporcionando um elevado nível de detalhe. Este modelo, conforme descrito por Stromquist (2020), utiliza fotografias aéreas e imagens de satélite como principais fontes de dados. A metodologia básica do SARCCUS envolve uma delimitação e classificação das unidades de terra erodidas, seguindo uma escala de severidade que varia desde erosão não aparente até erosão muito severa. Sacoer (2003) e Stromquist (2020) especificam que esta classificação inclui cinco níveis: erosão não aparente, erosão insignificante, erosão moderada, erosão severa e erosão muito grave. O resultado deste processo é um mapa em formato de grade que permite avaliar tanto aspectos qualitativos, como o tipo e a intensidade da erosão hídrica, quanto aspectos quantitativos, incluindo índices e comparações. Esta abordagem permite uma avaliação detalhada da erosão do solo a nível nacional e é particularmente útil para aplicação em grandes áreas. Whitlow (1990) ressalta que o modelo SARCCUS combina contrastes de tons, textura, situação topográfica e densidade da cobertura vegetal para identificar e classificar as características erosivas do solo.

**Método Indirecto Qualitativo Heurística:** é uma abordagem metodológica para avaliar a susceptibilidade à erosão do solo (Kachouri et al. 2014). Neste método, a susceptibilidade é determinada através da integração qualitativa de diversos mapas temáticos, cada um representando um factor condicionante específico. Uma característica distintiva desta técnica é a atribuição de pesos a esses factores, baseada no conhecimento e experiência de campo dos especialistas (Kachouri et al. 2014).

De acordo com Bui et al. (2011), o processo envolve a sobreposição e combinação de vários mapas, (relevo, solo, uso e cobertura da terra, precipitação, drenagem), entre outros. Ainda de acordo com os autores, ressaltam que os mapas resultantes podem ser significativamente

influenciados pela subjectividade inerente aos julgamentos dos especialistas, sendo necessário que seja efectuada uma análise de consistência. Esta metodologia é aplicada no presente estudo, utilizando o Método AHP para a determinação da erosão Potencial.

**Metodologia AHP:** O Método AHP (Analytic Hierarchy Process - Processo de hierarquia analítica), de acordo com Ebhuoma et al. 2022, destaca-se como uma técnica particularmente eficaz para atribuição dos pesos aos factores que influenciam o fenómeno em estudo. Desenvolvida por Saaty (1990), a AHP foi escolhida para este trabalho devido à sua abordagem na revelação de atributos no ambiente SIG, conforme demonstrado no estudo de Samizava (2006) e Ebhuoma et al. (2022). Esta metodologia distingue-se por várias características que se torna especialmente adequadas para o estudo da erosão hídrica do solo. O AHP organiza os factores condicionantes da erosão em uma estrutura hierárquica, permitindo uma análise sistemática e abrangente. O método baseia-se na comparação pareada das variáveis, o que permite uma avaliação mais precisa da importância relativa de cada factor. Utiliza uma escala de importância que varia de 1 a 9, proporcionando uma quantificação clara das avaliações qualitativas dos especialistas. As variáveis são categorizadas em uma matriz de ponderação, facilitando a visualização e análise das relações entre os diferentes factores. Uma das principais vantagens da metodologia AHP é a sua adequação para integração com Sistemas de Informação Geográfica, permitindo a espacialização eficiente dos resultados.

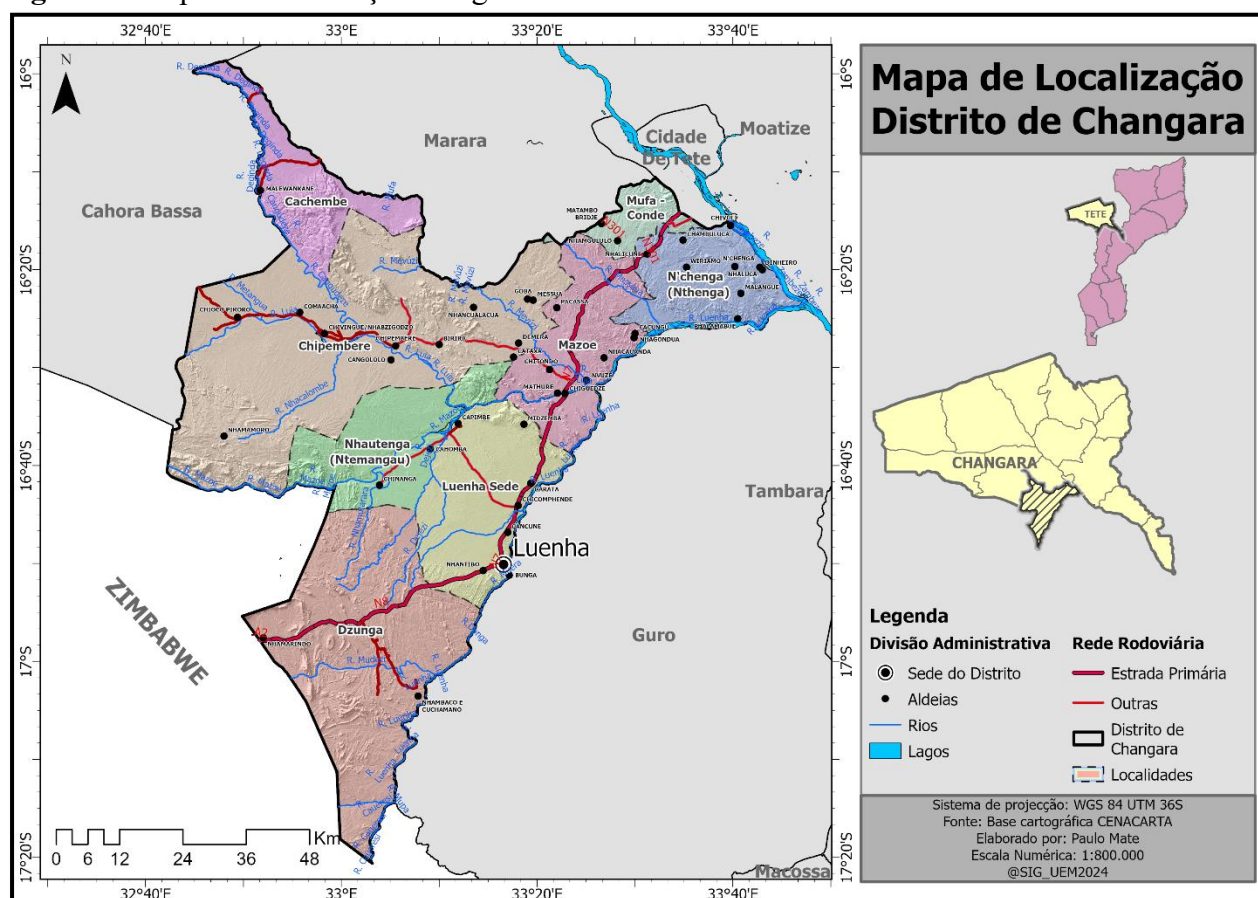
### III. ÁREA DE ESTUDO

#### 3.1. Localização geográfica

O Distrito da Changara esta localizado a Sul da Província de Tete, entre os paralelos 16°01' e 17°20' Sul e meridianos 32°40' e 33°45' Este (Figura 1). Tendo como limites geográficos a Norte com os Distritos de Marara, Cidade de Tete e Moatize, a Sudeste com o distrito de Guro através do rio Luenha, a Sul com distrito de Barué e a Oeste com o distrito de Cahora Bassa, a Sudoeste com a República do Zimbabwe (figura 1). A sua superfície é de aproximadamente 6 108 km<sup>2</sup>, sendo constituído por 8 localidade (Figura 1).

De acordo com os Resultados Definitivos do Censo Populacional de 2017 (INE, 2017), o Distrito de Changara apresentou uma população total de 128.543 habitantes. Deste total, 62.576 eram homens e 65.967 eram mulheres, e densidade demográfica de 19,36 hab/km<sup>2</sup>.

**Figura 1:** Mapa de Localização Geográfica da área de estudo. Fonte: CENACARTA.



#### 3.2. Caracterização Física-natural da área de estudo

### 3.2.1. Geologia

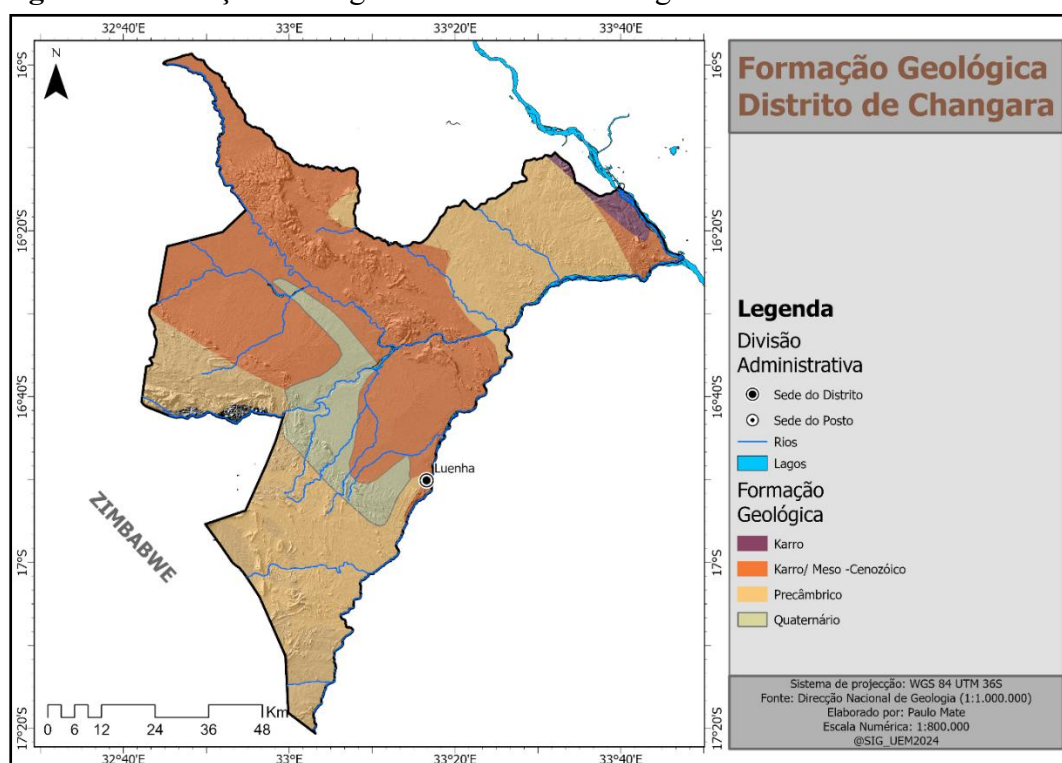
Do ponto de vista geológico (Figura 2 e tabela 1), O Distrito de Changara caracterizada por formações que abrangem desde o Pré-câmbrico até o Quaternário. Com base no mapa geológico distingue-se quatro principais unidades geológicas tabela 1.

**Tabela 1:** Formação Geológica e Rochas dominantes do distrito de Changara. Fonte: Direcção Nacional de Geologia (carta geológica 1.000.000), adaptado pelo Autor.

**Tabela 1:** Formação Geológica e Rochas dominantes do distrito de Changara. Fonte: DNG.

| Formação               | Rochas                                           | Área km <sup>2</sup> |      |
|------------------------|--------------------------------------------------|----------------------|------|
| Pré-câmbrico           | Gnaisses, migmatitos, granitóides e rochas afins | 2546                 | 42%  |
| Karro                  | série produtiva                                  | 85                   | 1%   |
| Karro/ Meso -Cenozóico | arenitos, argilas e rochas afins                 | 2916                 | 48%  |
| Quaternário            | Dunas                                            | 561                  | 9%   |
| Total                  |                                                  | 6108                 | 100% |

**Figura 2:** Formação Geológica do distrito de Changara. Fonte: DNG.



### 3.2.2. Relevo

O relevo do Distrito de Changara é caracterizada pela predominância de Planaltos, com altitude que variam de 110m a 1057m (figura 3). A zona central e oriental é caracterizada pela predominância de planícies, com altitudes entre 110m e 200m. Progredindo para Norte e Oeste,

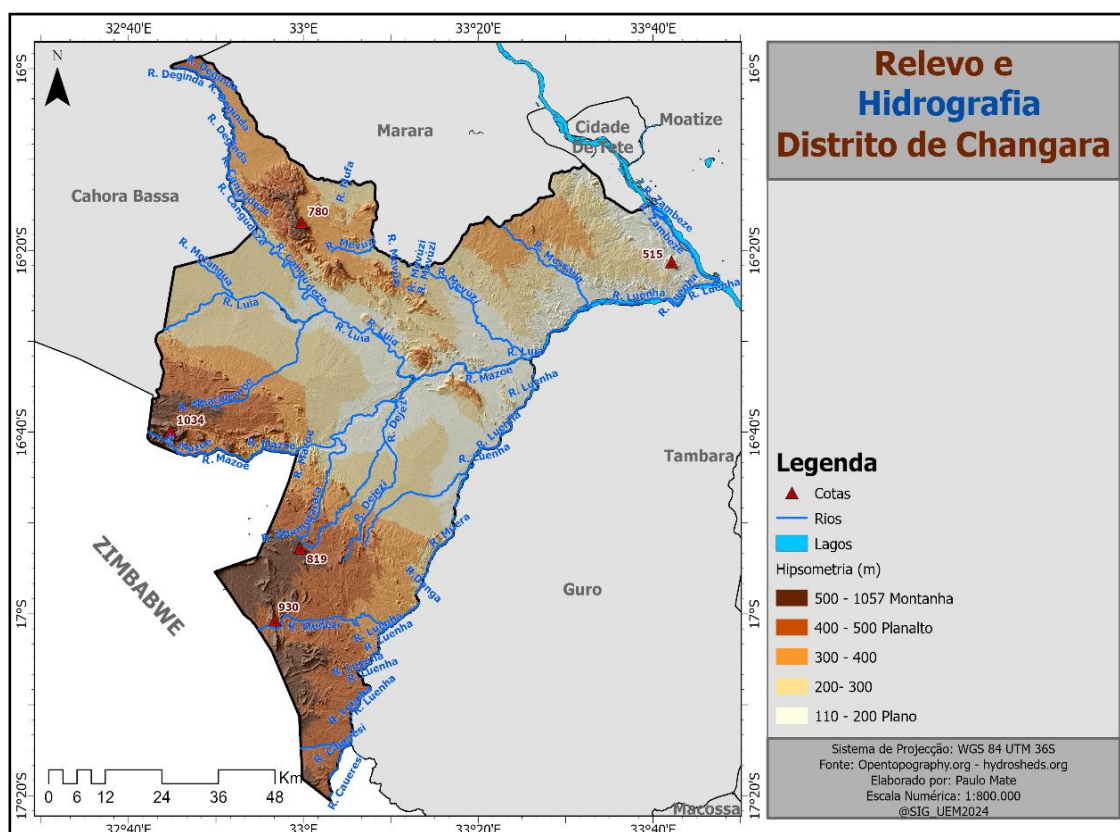
o relevo eleva-se para planaltos médios, com altitudes entre 200m e 400m. As regiões Oeste e Sudoeste são dominadas por planaltos altos e áreas montanhosas, com altitudes que variam de 400m a mais de 1000m. A zona Sudoeste e Norte é dominada por uma paisagem montanhosa, da qual se destaca a cadeia montanhosa de Dzimica (1034m), o ponto mais alto do Distrito situa-se em Chacalanga, seguido de M'pinga (930m) (MEF, 2015; figura 3).

### 3.2.3. Hidrografia

Os principais rios que drenam o distrito têm suas nascentes nas áreas mais elevadas, predominantemente nas formações Pré-câmblicas a Oeste e sul. Estes rios fluem em direcção às áreas mais baixas a Este e nordeste do distrito (figura 3).

O rio mais proeminente é o Luenha com caudal permanente, que forma o limite Sudeste do distrito. Observa-se uma densa rede de afluentes, especialmente nas áreas montanhosas e de planalto (r.Mudenzi, r.Dejezi, r.Nhamuturara, r.Mazoe, r.Nhacalombe, r.Luia, r.Cancudenze, r.Mevuzi, r.Mazoe, r.Messaua) dissecando o distrito em sentido Sul e Sudoeste para Norte e Nordeste, desaguardo no rio principal do distrito (rio Luenha) figura 3.

**Figura 3:** Relevo do distrito de Changara. Fonte: Opentopography.org



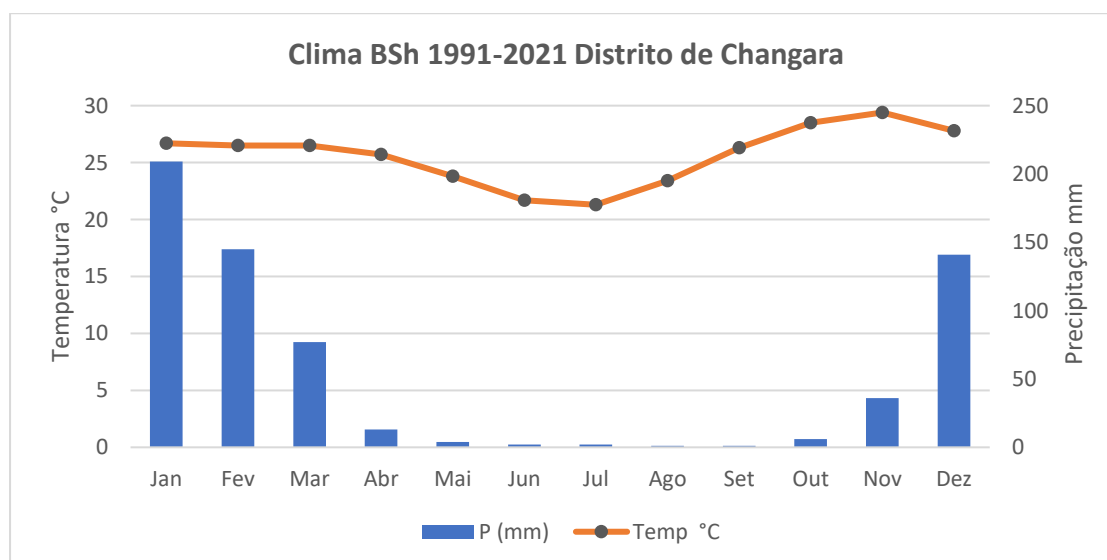
### 3.2.4. Clima

De acordo com a Climate-Data.org (2024), O clima predominante do distrito de Changara é conhecido como de estepe local BSh, gráfico 1. quanto a classificação do clima de Thornthwaite na qual o factor mais importante é a evapotranspiração potencial e a sua comparação com a precipitação, verifica-se que cerca de 46% do Distrito de Changara é abrangido pelo clima Subhúmido/Subárido, sendo que os restantes 56%, são abrangidos pelos climas Árido (41%), Húmido/Subhúmido (12%) e Semiárido (1%) figura 4c.

**Temperatura:** A temperatura média anual no Distrito de Changara é de 25°C. O mês mais quente é Outubro, com média de 28,5 °C, enquanto Julho é o mês mais fresco, com média de 21,3 °C. A amplitude térmica anual é relativamente baixa, inferior a 7,5°C.

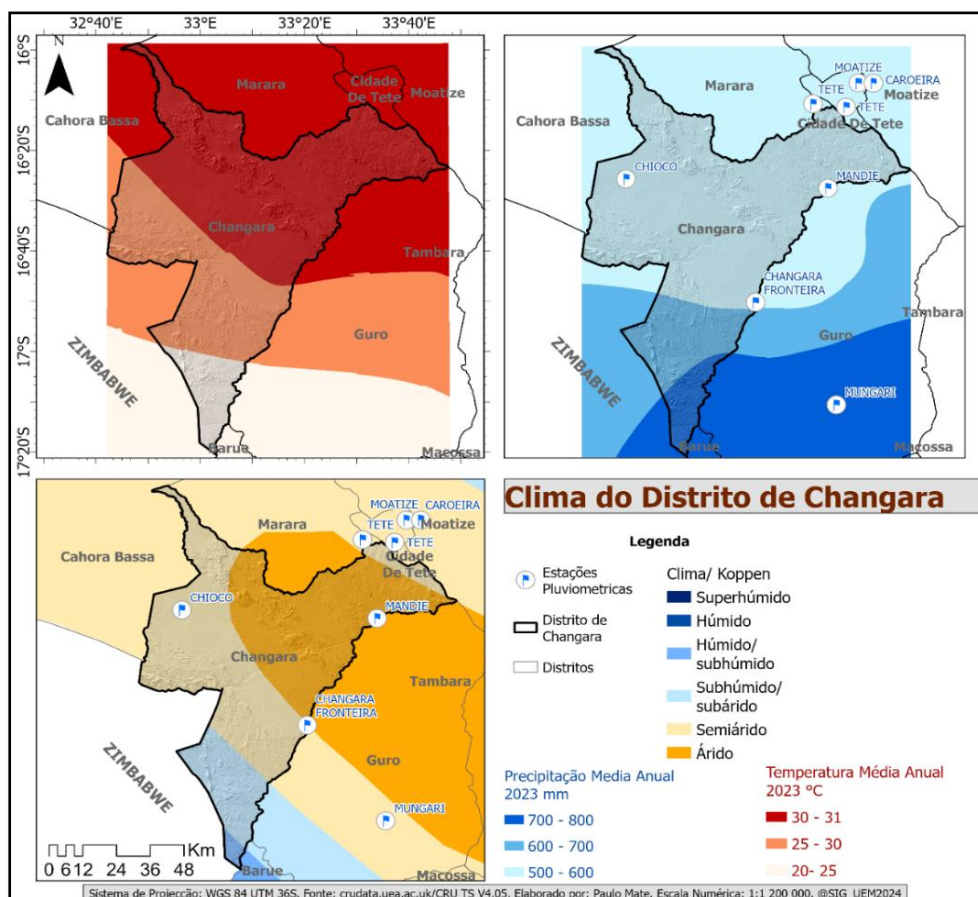
**Precipitação:** A precipitação média anual no distrito é de 637 mm. A distribuição da precipitação ao longo do ano é marcadamente sazonal, com 99,5% das chuvas ocorrendo entre Dezembro e Março. Janeiro é o mês mais chuvoso, com média de 209 mm. O período seco estende-se de Abril a Novembro, com precipitações mensais inferiores a 3 mm (MEF & MITADER, 2015).

**Gráfico 1:** Gráfico Termo pluviométrico. Fonte: adaptado de Climate-Data.org (2024).



**Figura 4:** Clima do Distrito de Changara. Fonte: Crudata.uea.ac.uk/ CRU TS V4.05





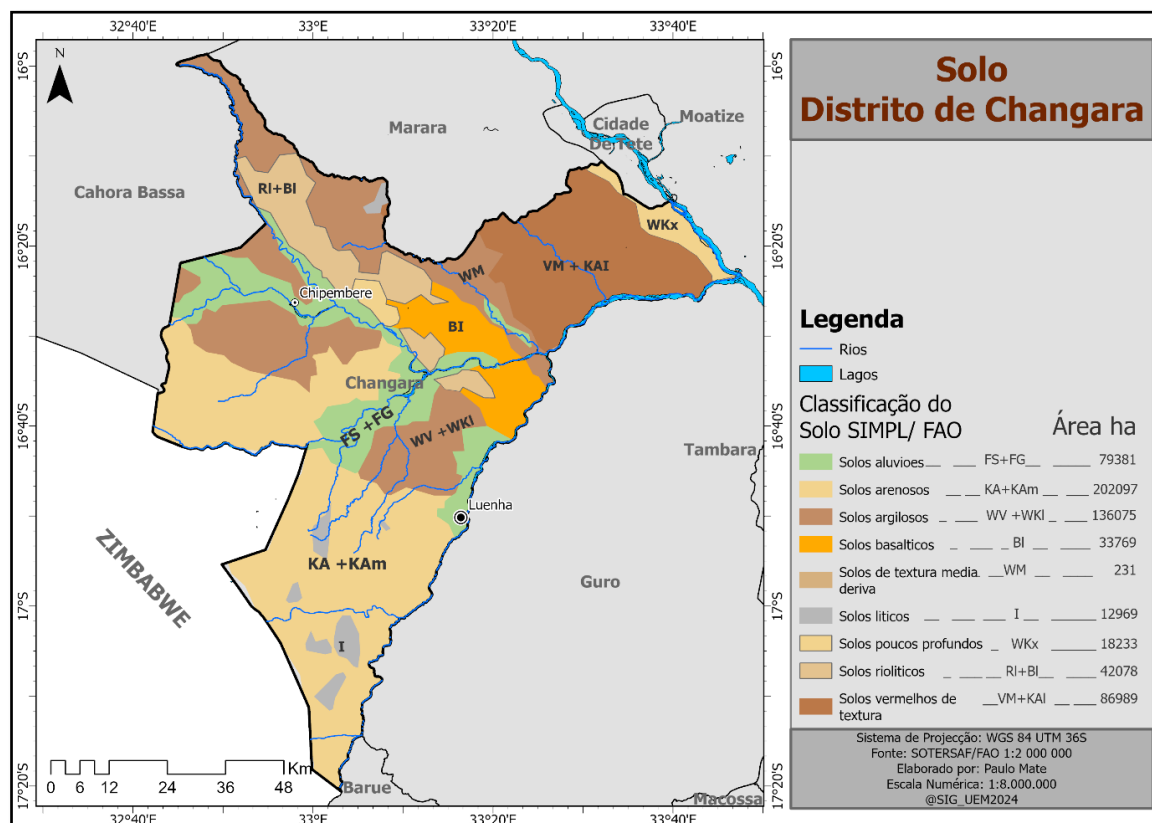
### 3.2.5. Solo

No Distrito de Changara, no que se refere à natureza pedológica dos solos, verificam-se como principais ocorrências, as seguidamente apresentadas na tabela 2.

**Tabela 2:** Principais tipo de solo do Distrito de Changara e suas Características. Fonte: SOTERSAF (2003). Elaborado pelo Autor.

| CLASS FAO              | SIMPL                         | Textura                                       | Geologia                         | Topografia          | Drenagem             | Profund | Fertilidade            | Tipo de Vegetação           | Principal Limitante                                 | Área ha | %    |
|------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------|---------------------|----------------------|---------|------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------------------|---------|------|
| <b>Eutric Cambisol</b> | Solos de textura media deriva | Franco -argilo - arenoso castanho             | Afloramento de rochas sedimenta  | Ondulado 0 - 8      | Boa                  | > 100   | Moderada 1 -3          | Floresta densa ou mata aber | Profundidade de solo, sodicidade, por vezes salinid | 231     | 0%   |
| <b>Eutric Leptosol</b> | Solos basálticos              | Franco -argilo - arenoso castanho escuro      | Manto basáltico ao longo do soc  | Ondulado 1 - 8      | Boa                  | < 30    | Moderada a alta 1 - 6  | Savana arborea , brenha pra | Profundidade do solo                                | 33769   | 6%   |
| <b>Ferric Lixisols</b> | Solos vermelhos de textura    | Franco -argilo - arenosos, castanho amarelado | Soco do pré-câmbrico, rochas aci | Ondulado 0 - 8      | Boa                  | > 100   | Baixa a Alta 0.9 - 4.5 | Floresta aberta, mata alt   | Condições de germinação, risco de erosão            | 86989   | 14%  |
| <b>Eutric Leptosol</b> | Solos liticos                 | Franco- arenoso, castanho                     | Soco do precambrico, Rochas      | Montanhos >30%      | Excessiva            | 0 - 30  | Baixa a moderad        | Mata aberta mediana ou pr   | Profundidade e risco de erosão                      | 12969   | 2%   |
| <b>Calcaric Cambis</b> | Solos poucos profundos        | Franco -argilo - arenoso castanho             | Afloramento de rochas sedimenta  | Ondulado 0 - 8      | Imperfeita a boa     | < 100   | Moderada 1- 3          | Mata arbustiva mediana      | Profundidade do solo, sodicidade, por vezes salini  | 18233   | 3%   |
| <b>Eutric fluvisol</b> | Solos aluviões                | Franco -Arenoso, castanho acinzentado         | Aluviões holocenicos             | plana 0-1           | Imperfeita a ma      | > 100   | Baixa a alta 0.5 - 3.5 | Floresta galeria e mata a   | Por vezes sodicidade e drenagem                     | 79381   | 13%  |
| <b>Chromic Luvisol</b> | Solos argilosos               | Argiloso castanho avermelha                   | Afloramento de rochas sedimenta  | Suavemente ondulada | Imperfeita a moderad | < 100   | Moderada 1 - 1.5       | Mata aberta ou savana arb   | Por vezes profundidade do solos <1m, erosão         | 136075  | 22%  |
| <b>Eutric Leptosol</b> | Solos riolíticos              | Franco -Argilo - arenosos, castanho amarelado | Cadeia vulcânica dos libo        | Escarpa 8           | Moderada             | < 30    | Moderada a alt         | Savana Arbórea ou Matagal   | Profundidade do solo                                | 42078   | 7%   |
| <b>Cambic arenosol</b> | Solos arenosos                | Arenoso castanho acinzentado                  | Soco pré-câmbrico, rochas acidas | Ondulado 0 - 8      | Pouco excessiva      | > 100   | Baixa - moderada       | Floresta aberta, matagal    | Capacidade de retenção de água, fertilidade         | 202097  | 33%  |
|                        |                               |                                               |                                  |                     |                      |         |                        |                             |                                                     | 611822  | 100% |

**Figura 5:** Distribuição espacial do tipo de solos no Distrito de Changara. Fonte: SOTERSAF.



### 3.2.6. Uso e Cobertura da terra

Com uma área total de 6.143,38 km<sup>2</sup> o distrito de Changara é dominado por Floresta Herbácea Arborizada, ocupando uma superfície de 1277,46 km<sup>2</sup>, correspondente a 20% da área total do Distrito (figura 6), tendo as seguintes formas principais de uso e cobertura da terra.

**Área Habitacional:** ocupa uma superfície de 150,45 km<sup>2</sup> (2,45%) figura 6. A maior parte da população reside no posto administrativo de Luenha e em aldeias dispersas ao longo dos principais cursos de água como o rio Luenha e seus afluentes, e próximos a vias de acesso como ao longo da estrada número sete (N7), figura 6 (MEF & MITADER, 2015) Estas áreas são caracterizadas por habitações do tipo palhota (MAE, 2014).

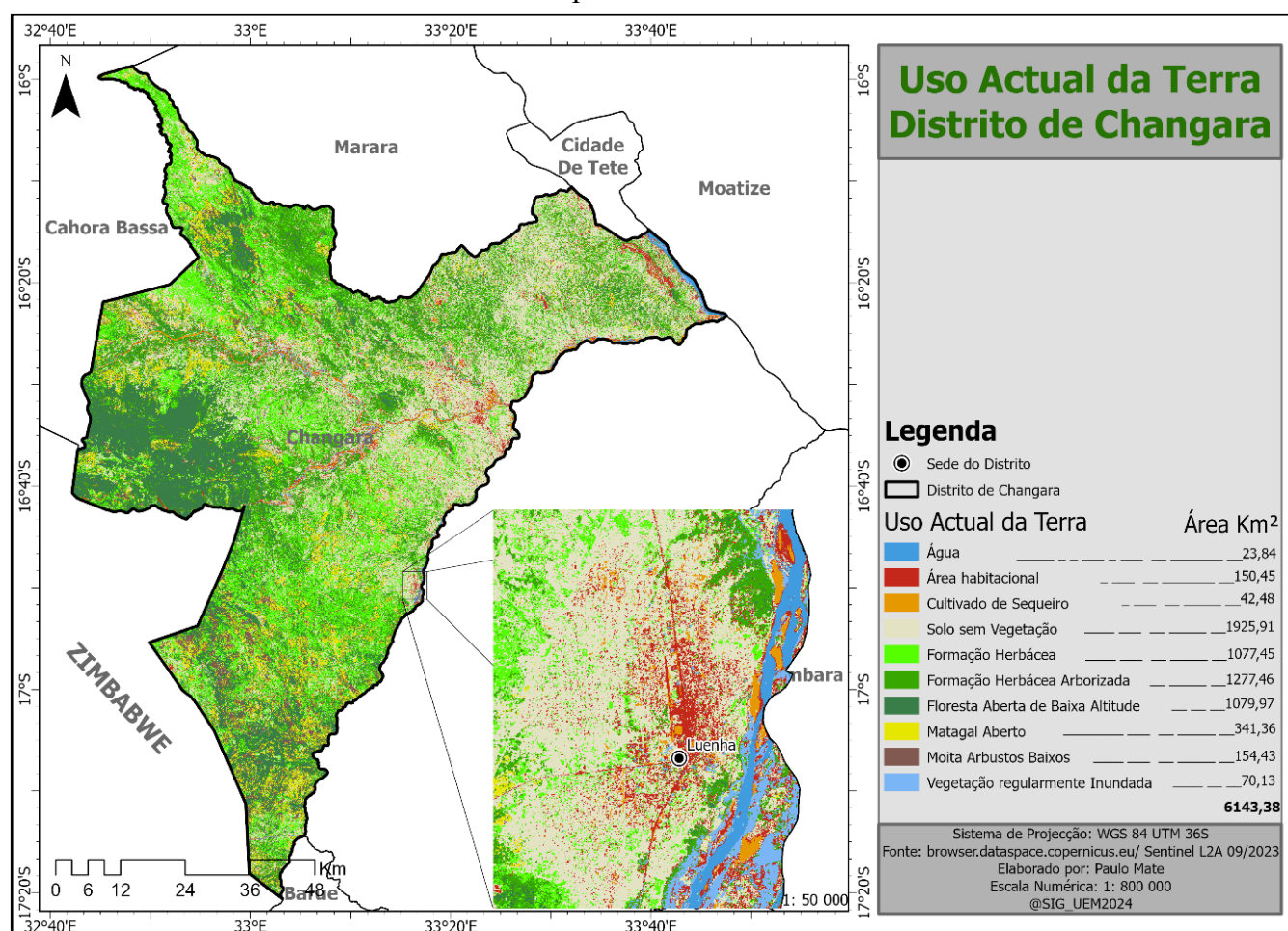
**Solo sem Vegetação:** 1.925,91 km<sup>2</sup> correspondente a 31,35% da área total do distrito. Caracterizada por áreas sem cobertura vegetal aparente, especialmente durante a estação seca (Dezembro a Março). Parte destas áreas é utilizada para agricultura itinerante durante a estação chuvosa, com culturas tolerantes à seca como mapira e mexoeira (figura 6; MEF, 2015).



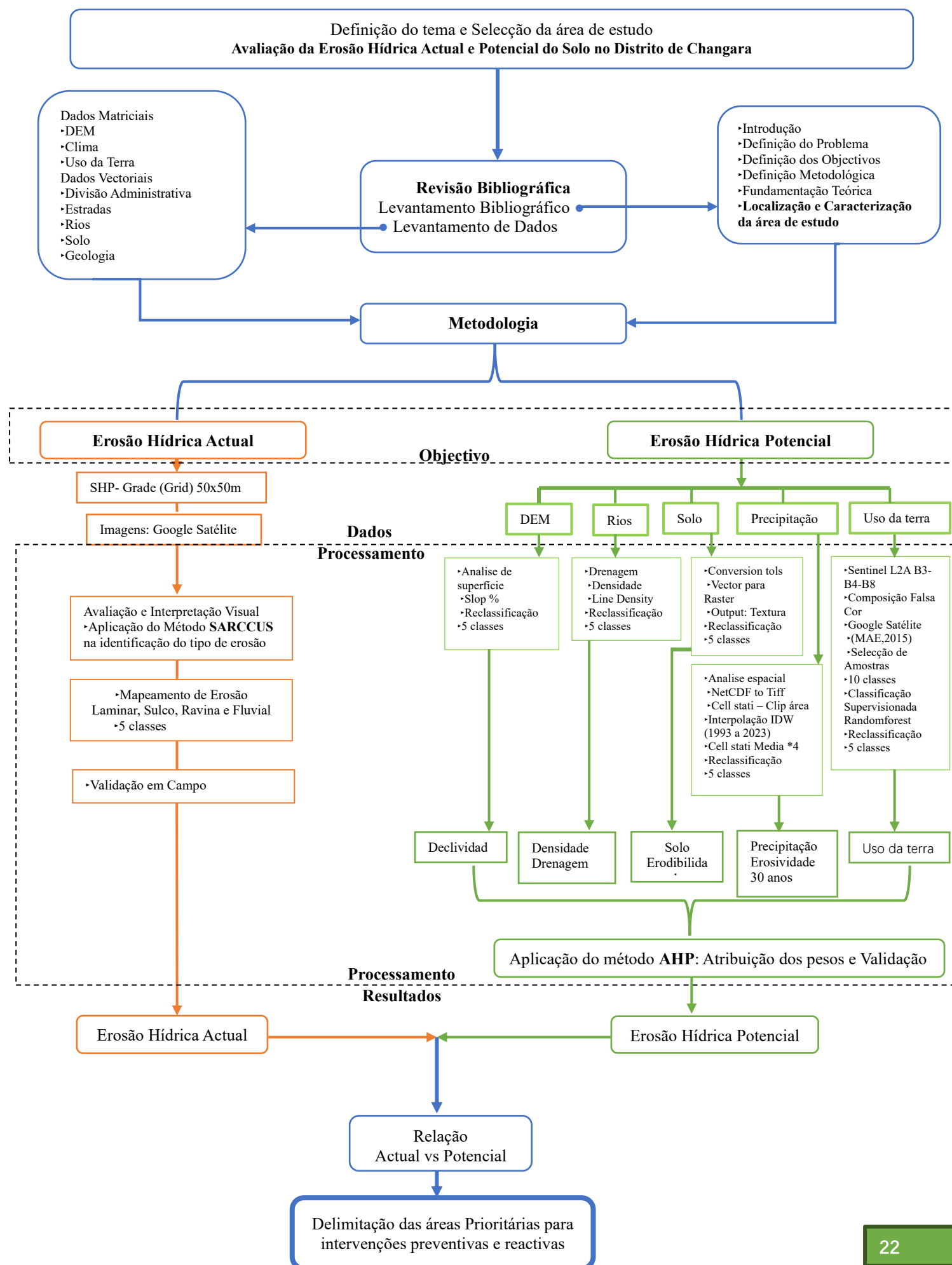
**Cultivado de Sequeiro:** 42,48 km<sup>2</sup> (0,69%) compreende as áreas agrícolas. Cerca de 80% da população economicamente activa do distrito tem a agricultura como a sua principal actividade (MAE, 2014). De um modo geral, a agricultura é praticada manualmente em pequenas explorações familiares em regime de consociação de culturas com base em variedades locais que compreende a mapira/mexoeira, tabaco, gergelim, batata doce, hortícolas e o milho que é produzido em consociação com feijão nhemba. A produção agrícola é feita predominantemente em condições de sequeiro, que seguem a rede hidrográfica ao longo do rio Luenha e seus afluentes figura 6. (MAE, 2014).

**Floresta:** 2.853,22 km<sup>2</sup> (46,44%) Esta categoria agrupa várias classes florestais (Floresta Aberta de Baixa Altitude: 1.079,97 km<sup>2</sup>; Matagal Aberto: 341,36 km<sup>2</sup>; Moita Arbustos Baixos 154,43 km<sup>2</sup> (figura 6); Formação Herbácea Arborizada e Herbácea: 2.354,9 km<sup>2</sup> (38,4%).

**Figura 6:** Uso e cobertura da terra Distrito de Changara. Fonte: browser.dataspace.copernicus.eu/ Sentinel L2A B3-B4-B8 09/2023. Elaborado por Autor.



**Tabela 3:** Fluxograma Geral dos procedimentos Metodológicos. Elaborado pelo Autor.



## IV. MATÉRIAS E MÉTODOS

### 4.1. Materiais

#### 4.1.1. Levantamento Bibliográfico

Com a definição dos objectivos do estudo, realizou-se o levantamento bibliográfico que incluiu teses, artigos, livros e revistas científicas nacionais e internacionais relacionadas com a erosão hídrica do solo. Este processo permitiu a compreensão e definição dos conceitos, a obtenção de dados relevantes e a selecção das metodologias mais adequadas para os objectivos do estudo. Os artigos são citados ao longo do texto, conforme a sua utilização. Entre as principais fontes consultadas, destacam-se: a 3ª edição do livro de R.C.P Morgan (2005); o Plano de Acção para a Prevenção e Controle da Erosão de Solos 2008-2018 (MAE, 2007); o Perfil Ambiental do distrito de Changara (MEF & MITADER, 2015), a tese de doutorado de Sabil Mandala (2016); o artigo de Lennart Stromquist (2020); a Revista Electrónica de Gestão e Tecnologias Ambientais (Neto et al., 2022); e o trabalho de Paulo Covele (Covele, 2022).

#### 4.1.2. Levantamento de Dados

O estudo baseia-se na combinação de diversos tipos de dados espaciais, conforme recomendado pela literatura sobre erosão hídrica do solo, para atingir os objectivos propostos. Os dados foram obtidos a partir de diversas fontes nacionais e internacionais, priorizando sempre a aquisição de informações provenientes de fontes credenciadas, precisas e actualizadas.

Para o processamentos e avaliação dos dados destacam-se os softwares:

**Tabela 4:** Softwares utilizados para efectivação do presente estudo. Fonte: Autor.

| Softwares                                        | Descrição                                                                                                                       | Aplicação                                                                                                                                                                                                   |
|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ArcGIS Pro 3.1.5 (Advanced-Licença estudantegeo) | Software SIG da Esri, usado para análise espacial, visualização de dados, mapeamento e gestão de dados espaciais.               | Análise espacial, cálculo de densidade, interpolação IDW, análise de declividade, conversão Vector-Raster, re-projecção UTM, reclassificação, operações de Overlay, e construção de modelos (ModelBuilder). |
| QGIS 3.32.3 Lima LR (grátis)                     | Software SIG de código aberto (gratuito) com ampla gama de funcionalidades para processamento e análise de dados geo-espaciais. | Edição vectorial, Mosaicos, recorte (clip), Grelha (grids), plugin Quickmap service Google Satélite, criação de arquivos shapefile, classificação supervisionada.                                           |
| Excel 2021 (Licenciado)                          | Aplicativo de planilha electrónica com recursos avançados de análise de dados e visualização.                                   | Realização de cálculos estatísticos, criação de gráficos e tabelas para análise e apresentação de dados quantitativos do estudo.                                                                            |

**Tabela 5:** Descrição dos Dados. Fonte: Autor.

| Dado                          | Fonte                    | Utilidade                                                                 | Resolução Espacial/Escala | Data de Aquisição | Tipo de Dado | Disponível em                                                                                                                   |
|-------------------------------|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------|-------------------|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| DEM (Digital Elevation Model) | AlosPalsar Banda L       | Para o mapa de relevo e <b>Factor Declividade</b>                         | 12,5 m                    | 2016              | Raster       | <a href="https://search.asf.alaska.edu/">https://search.asf.alaska.edu/</a>                                                     |
| Rios                          | Hydrosheds               | Para o mapa de hidrografia e <b>Factor Densidade de drenagem</b>          | 500 m                     | 2023              | Vector       | <a href="https://www.hydrosheds.org/products/hydrorivers">https://www.hydrosheds.org/products/hydrorivers</a>                   |
| Uso da Terra                  | Sentinel L2A B3-B4-B8    | Para Classificação Supervisionada, <b>Factor Uso e Cobertura da Terra</b> | 10m                       | 09/2023           | Raster       | <a href="https://browser.dataspace.copernicus.eu/">https://browser.dataspace.copernicus.eu/</a>                                 |
| Estrada                       | Openstreet map.org       | Principais vias de Acesso                                                 | 1m                        | 2024              | Vector       | PortalGis UEM (Estudentegeo) <a href="https://arcg.is/CbK0K0">https://arcg.is/CbK0K0</a>                                        |
| Divisão Administrativa        | CENACAR TA               | Para delimitação da área de estudo                                        | 1:250.000                 | -                 | Vector       | PortalGis UEM (Estudentegeo) <a href="https://arcg.is/CbK0K0">https://arcg.is/CbK0K0</a>                                        |
| Solo                          | SOTERSA F                | Para caracterização do solo e <b>Factor Erodibilidade</b>                 | 1:2.000.000               | 2003              | Vector       | PortalGis UEM (Estudentegeo) <a href="https://arcg.is/CbK0K0">https://arcg.is/CbK0K0</a>                                        |
| - Precipitação                | crudata.uea.ac.uk        | Para classificação climática e <b>Factor Intensidade Pluviométrica</b>    | 0,5°x0,5° – 55.000m       | 1993-2023         | Raster       | <a href="https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4_08/cruts">https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4_08/cruts</a> |
| Geologia                      | DNG                      | Formação geológica e principais rochas                                    | 1:1.000.000               | -                 | Vector       | PortalGis UEM (Estudentegeo) <a href="https://arcg.is/CbK0K0">https://arcg.is/CbK0K0</a>                                        |
| Imagens de Satélite           | Baseband-Google Satélite | Para o Mapeamento da Erosão Hídrica Actual                                |                           | 2024              | Raster       | Qgis Plugin QuickMapServices Google Satélite, Google hybrid                                                                     |
|                               |                          | •QuickBird                                                                | 0,60m                     |                   |              |                                                                                                                                 |
|                               |                          | •GeoEye                                                                   | 0,41m                     |                   |              |                                                                                                                                 |
|                               |                          | •WorldView                                                                | 0,31m                     |                   |              |                                                                                                                                 |
|                               |                          | •DigitalGlob                                                              | 0,30                      |                   |              |                                                                                                                                 |

## 4.2. Procedimentos Metodológico

Para avaliar a distribuição espacial da erosão hídrica actual e potencial no distrito de Changara, foram implementados dois métodos diferentes, de acordo com a literatura. O modelo SARCCUS foi aplicado para avaliar a erosão hídrica actual, enquanto o método AHP foi utilizado para avaliar a erosão hídrica potencial. A sequência detalhada dos procedimentos metodológicos está representada no fluxograma geral da metodologia a cima tabela 3.

#### **4.2.1. Metodologia de Avaliação de Erosão Hídrica Actual**

O Método Indirecto Qualitativo Geomorfológico, aplicado através do modelo **SARCCUS** (Southern African Regional Commission for the Conservation and Utilization of the Soil - Comissão Regional da África Austral para a Conservação e Utilização do Solo), será utilizado para o Mapeamento da Erosão Actual no Distrito. Esta abordagem baseia-se nos estudos de Nordstrom (1988), Saccor (2003) e Stromquist (2020) que demonstraram a eficácia do Modelo SARCCUS na interpretação visual de imagens de satélite de alta resolução espacial em SIG. O método fornece um mapeamento detalhado da erosão actual em grande escala, permitindo a identificação dos tipos de erosão (laminar, sulco, ravinar e fluvial), grau de severidade e distribuição espacial. O processo metodológico será desenvolvido em 4 etapas:

##### **Etapla 1: Criação da Grade de Sobreposição**

Inicialmente, é criada um shapfile de polígono de grade de sobreposição, composto por células de 50x50m, cobrindo toda a área de estudo (Covele, 2022). Este processo é realizado no software QGIS, utilizando as ferramentas de Processamento > Criação de Vector > Grade. A Grade é definida com os seguintes parâmetros: Tipo: Rectângulo; Espaçamento: 50m (vertical e horizontal); Atributos: ID e tipo de erosão. Esta Grade será sobreposta às imagens de satélite, especificamente como base para o mapeamento sistemático e detalhado das feições erosivas. A escolha da dimensão de 50x50m para as células da grade baseia-se no equilíbrio entre o nível de detalhe necessário para identificar as feições erosivas e a eficiência do processo de mapeamento, considerando a extensão total da área de estudo (Covele, 2022).

##### **Etapla 2: Interpretação Visual de Imagens de Satélite**

A interpretação visual é realizada utilizando imagens de satélite de alta resolução espacial (0.30m, 0.31m, 0.45m, 0.60m, 10m) disponíveis através do Google Satélite, acessadas via QGIS plugin (Quickmap service). Conforme Boardman (2016), a resolução espacial destes

sensores (DigitalGlobe, Worldview, GeoEye, QuickBird, Sentinel L2A) é suficiente para distinguir diferentes tipos de erosão hídrica em larga escala.

**Parâmetros de Identificação:** De acordo com o modelo SARCCUS (Arnoldus, 1974), para a identificação e delimitação de feições erosivas em imagens de satélite, devem ser considerados alguns parâmetros como Escala, Características físicas da área de estudo. Desta forma são consideradas os seguintes parâmetros:

**P1-Escala:** É Utilizada uma escala de 1:500, adequada para identificar diferentes tipos de erosão hídrica através de cores com diferentes tonalidades (Mandala, 2016).

**P3-Características físicas:** Em cada célula da grade representada em uma sobreposição transparente a identificação das feições erodidas, será com base em cor (tonalidade), textura, forma, tamanho e contexto (cobertura vegetal, uso da terra) (Stromquist, 2020).

**Classificação da Erosão:** O modelo SARCCUS classifica a erosão hídrica em 5 classes, conforme descrito por Saccor (2003) e Stromquist (2020), descritas da seguinte forma:

**Tabela 6:** Classificação da erosão hídrica actual.

| Classes                               | Tipo de erosão  | Interpretação na Foto Aérea e/ou Imagem de Satélite                                                                                                                                                                                                                                     |
|---------------------------------------|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>1-Muito baixo</b>                  | Nenhum aparente | Nenhum indício visível de erosão na foto aérea ou na imagem de satélite; o nível de manejo do solo mostra-se alto.                                                                                                                                                                      |
| <b>2- Baixo</b>                       | Laminar         | Áreas de tonalidades claras observadas nas fotos aéreas; Erosão deduzida pela cobertura vegetal pobre, pelos depósitos de sedimentos e pelo tronco das plantas observadas no campo.                                                                                                     |
| <b>3-Moderada</b>                     | Sulco           | Áreas erosivas de fácil discriminação nas fotografias aéreas, cobertura de plantas muito pobre e depósitos de sedimentos extensivos; associada a pequenos sulcos observados no campo. -Parte do horizonte A foi removido.                                                               |
| <b>4-Alta</b>                         | Ravinar         | Claramente observada nas fotos aéreas, possui, usualmente, cerca de 1 m de profundidade. Não pode ser atravessada por máquinas agrícolas.<br>- Padrões intrincados de ravinas profundas (principalmente de 3 – 5 m de profundidade), expondo seções inteiras de solo em certos lugares. |
| <b>5-Muito alto</b>                   | Fluvial         | Claramente observada nas fotos aéreas, ocorrendo nas margens do rio.                                                                                                                                                                                                                    |
| Fonte: Adaptado de Stromquist (2020). |                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                         |

**Etapa 3:** Processo de mapeamento da erosão actual segundo as etapas descritas anteriormente.

**Tabela 7:** Processo de mapeamento.

| Tipo de Erosão | Imagem de Satélite<br>Interpretação Visual | Imagem de Campo de<br>pontos amostrais |
|----------------|--------------------------------------------|----------------------------------------|
|----------------|--------------------------------------------|----------------------------------------|



### **1-Sem Erosão aparente**

► como pode se observar na imagem a1 e a2 a direita. Apresenta cobertura vegetal herbácea-arborizada, não havendo indício aparente de nenhum tipo de erosão. Sendo áreas com características semelhantes classificados na categoria 1



### **2-Laminar**

► Na imagem a direita b1 e b2 apresenta se baixa/nenhuma cobertura vegetal, sendo que:

-A cor de tonalidade amarela é o solo arenoso não-consolidado em estado inicial da erosão.

-A tonalidade castanha representa o solo arenoso já erodido, ficando a camada consolidada.



### **3-Sulco**

► Na imagem a direita c1 e c2 apresenta se nenhuma cobertura vegetal, sendo que:

-A tonalidade castanha escuro representa o solo arenoso consolidado já erodida a camada superficial no estágio 2.

-A tonalidade amarelo claro, as ramificações observadas representa cortes pouco profundo no solo, caracterizado por estágio 3



### **4-Ravinar**

► Na imagem a direita d1 e d2 representa a ampliação e aprofundamento dos sulcos, formando uma grande cavidade em extensão e profundidade, caracterizado por estágio 4.

-Em termos de perspectiva (observe o tamanho das casas comparado com a ravina).

-O estágio mais severo.



### **5-Fluvial**

► Na imagem a direita e1 e e2 representa a remoção de solos nas margens dos cursos de água, causados pelo aumento e diminuição do caudal do rio.



Fonte: Autor.

#### **Etapa 4: Validação do mapeamento em Campo**

De acordo com Covele (2022) o trabalho de campo é imprescindível para a confirmação das interpretações realizadas a partir das imagens de satélite e para o ajuste do mapeamento quando necessário. Este processo permite confrontar os resultados obtidos em gabinete com as condições reais no terreno, garantindo a consistência do mapa com a realidade (Covele, 2022). Neste contexto, o trabalho de campo foi iniciado com a selecção de pontos amostrais que apresentam sinais de erosão laminar, sulco, ravinar e fluvial nas imagens de satélite do Google. Os pontos (coordenadas geográficas, google map) foram enviados à equipe de campo, composta por duas pessoas (1 nativo-guia e assessor do autor). No local, a equipe realizou o registro com fotografias de alta resolução (64 megapixels), ver (Anexo 3). As imagens capturadas nos pontos amostrais foram posteriormente enviadas ao autor e confrontadas com o mapa de erosão hídrica actual, (Tabela 7 1b,2b,3b,4b e 5b). A comparação entre os tipos de erosão mapeados e as condições reais verificadas em campo revelou uma alta correspondência, demonstrando a eficácia do mapeamento. Portanto, confirma-se a validade do mapa de erosão hídrica actual, apresentada nos resultados (figura 7).

#### **4.2.2. Metodologia de Avaliação de Erosão Hídrica Potencial**

Para o mapeamento da erosão hídrica potencial no Distrito de Changara, é adoptado o Método Indirecto Qualitativo Heurístico, aplicado por meio do Processo de Hierarquia Analítica (AHP). Este método foi seleccionado devido à sua capacidade de verificar a consistência na atribuição de pesos aos factores determinantes, de acordo com seu grau de importância nos processos erosivos da área de estudo Falcão (2014) e Neto et al., (2022). Tal abordagem reduz a subjectividade e as incoerências na ponderação dos factores envolvidos (Neto et al., 2022).

**A metodologia compreende 5 etapas principais:**

##### **4.2.2.1. Preparação dos Factores determinantes da erosão hídrica**



Os factores utilizados neste estudo foram seleccionados com base em sua influência na determinação da erosão hídrica do solo no distrito de Changara, conforme descrito por Wambeke (1986), MICOA (2007), (MEF & MITADER, 2015), Mandala (2016), Ebhuoma et al. (2022). Assim foi possível estabelecer os parâmetros e as classes de susceptibilidade erosiva utilizada no presente estudo. Desta forma obtém-se 5 factores principais em ordem de importância para avaliação da susceptibilidade a erosão hídrica: Uso e Cobertura da terra, Erodibilidade do solo, Declividade, Intensidade Pluviométrica e densidade de drenagem. De acordo com Mathias (2016), para a elaboração de cruzamentos entre os factores determinantes, é necessário proceder a algumas operações preliminares, a fim de padronizar os mapas que serão submetidos aos cruzamentos. Três condições são exigidas:

- a)** Atribuição de números inteiros a cada intervalo de classe dos mapas (factores);
- b)** Padronização do tamanho da célula (resolução espacial) em todas as camadas para consistência e precisão da análise pareada. Desta forma, todas as camadas tiveram sua saída do raster com tamanho da célula 10×10m;
- c)** Uniformização da quantidade de classes em grau de susceptibilidade em todos mapas.

Utilizando-se o software ArcGIS Pro, foi aplicada a ferramenta Reclassify, componente do Toolbox Spatial Analyst, gerando mapas em que, para cada intervalo de uma ou mais classes, foi atribuído um número inteiro (de 1 a 5), estabelecendo 5 classes para cada mapa. Essas classes foram baseadas de acordo com Mandala (2016) e Covele (2022), que classificam a susceptibilidade à erosão em: 1-Muito Baixa, 2-Baixa, 3-Moderada, 4-Alta e 5-Muito Alta.

No processo de reclassificação, atenta-se à definição de uma escala crescente, relativa à tendência que o atributo mapeado oferece à evolução dos processos erosivos. Dessa forma, as variáveis que, em escala crescente de grandeza, representam proporcionalmente uma escala decrescente de influência sobre as características, foram definidas inversamente.

A seguir, encontram-se descritos os critérios de reclassificação de cada factor (Mandala, 2016).

| Classe | Susceptibilidade | Evolução                                                                          |
|--------|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| 1      | Muito Baixa      |  |
| 2      | Baixa            |                                                                                   |
| 3      | Media            |                                                                                   |
| 4      | Alta             |                                                                                   |
| 5      | Muito Alta       |                                                                                   |

**Tabela 8:** Classificação da Susceptibilidade a erosão hídrica.

#### 4.2.2.2. Processamento dos Factores Determinantes da Erosão

##### 4.2.2.2.1. Factor Uso e Cobertura do Solo

O uso e cobertura da terra é um factor crucial na modelagem da erosão hídrica, pois a susceptibilidade à erosão varia significativamente entre diferentes tipos de cobertura terrestre (Szilassi et al., 2006).

Para este estudo, o mapa de uso e cobertura da terra foi desenvolvido utilizando classificação supervisionada de imagens de satélite Sentinel-L2A. A escolha destas imagens deve-se ao facto de serem produtos de nível 2, com correcções atmosféricas já aplicadas, e melhor resolução espacial (10m) de imagens de satélite disponibilizadas gratuitamente.

Seguindo as recomendações de Jia et al. (2014) as imagens foram adquiridas no mês de Setembro (09/2023), durante a estação seca para a classificação, devido ao maior contraste entre classes de cobertura do solo e menor interferência de nuvens.

A composição de bandas B3 (verde), B4 (vermelho) e B8 (infravermelho próximo) foi utilizada para criar uma imagem de falsa cor através do plugin SCP (Semi-Automatic Classification) (Jia et al. 2014). Esta composição serviu de base para o levantamento das amostras de treinamento para a classificação supervisionada (Trindade et al., 2023). A selecção das amostras baseou-se em três fontes principais: observação directa em imagens de alta resolução espacial do Google Earth Satélite, revisão bibliográfica (MAE, 2014; MEF & MITADER, 2015) sobre o uso da terra na área de estudo. Foram identificadas dez classes de uso e cobertura, de acordo com sistema de classificação AFRICOVER e nomenclatura da CENACARTA (Mazalo, 2018): água, área habitacional, cultivado de sequeiro, solo sem vegetação, formação herbácea,

formação arborizada, floresta aberta de baixa altitude, matagal aberto, moita arbustos baixos (figura 6).

Para a classificação supervisionada, utilizou-se o algoritmo RandomForest através do plugin DZETSAKA, conhecido por sua eficácia em classificação supervisionada de imagens de satélite (Trindade et al., 2023). Cunha et al. (2020) recomendam que seja feita uma avaliação de acurácia dos resultados da classificação para validação do mapa. seguindo as metodologias de Niquisse et al. (2017) e Cunha et al. (2020) foi realizada com base na matriz de confusão. A avaliação resultou em uma precisão global de 95% e um Índice Kappa de 0,886 (Anexo 1). Estes valores indicam que a classificação de uso e cobertura da terra apresenta uma concordância muito boa com a realidade, demonstrando boa precisão e confiabilidade.

Após a criação do mapa de uso e cobertura da terra, procedeu-se à sua reclassificação para atender aos critérios de padronização estabelecidos por Mathias (2016) para integração dos factores determinantes da erosão hídrica potencial. Este processo foi realizado no software ArcGIS Pro, utilizando a ferramenta Reclassify tabela 9 e figura 8A.

**Tabela 9:** Susceptibilidade a erosão hídrica do solo segundo factor uso e cobertura da terra.

| Classe grau de susceptibilidade                                 | Uso e cobertura da terra                                                        | Descrição                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>1 - Muito Baixa</b>                                          | •Floresta aberta de baixa altitude<br>•Matagal Aberto<br>•Moita Arbustos Baixos | Estas áreas possuem cobertura vegetal que protege o solo contra o impacto directo da chuva e reduz o escoamento superficial. E as suas raízes, facilitam a infiltração e fixação do solo contra processos erosivos.                                                                                                                                                                                                          |
| <b>2 - Baixa</b>                                                | •Formação herbácea arborizada                                                   | Oferecem uma protecção considerável ao solo, embora menor que as áreas florestais.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| <b>3 - Moderada</b>                                             | •Formação herbácea                                                              | Proporcionam uma protecção intermediária ao solo.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| <b>4 - Alto</b>                                                 | •Cultivado de Sequeiro                                                          | As práticas agrícolas aumentam significativamente a susceptibilidade devido a diversos factores: a exposição temporária do solo durante a rotação de culturas, técnicas rudimentares de preparo do solo, falta de práticas de conservação, susceptíveis a chuvas intensas na agricultura de sequeiro, monocultura temporária que degrada a estrutura do solo, e a remoção da cobertura vegetal natural para áreas agrícolas. |
| <b>5 - Muito Alto</b>                                           | •Solo sem Vegetação<br>•Área Habitacional<br>•Água                              | O solo exposto é altamente susceptível à erosão, enquanto áreas habitacionais podem aumentar o escoamento superficial. Corpos de água, embora não sofram erosão directamente, são incluídos nesta categoria devido ao seu papel na erosão fluvial.                                                                                                                                                                           |
| Fonte: MAE (2015); Mandala (2016), Classificação Supervisionada |                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |

#### 4.2.2.2.2. Factor Intensidade Pluviométrica

Mandala (2016) afirma que a precipitação média anual e a duração do período chuvoso definem a intensidade intempérica, permitindo quantificar o grau de susceptibilidade à erosão hídrica. A intensidade pluviométrica representa a energia potencial disponível para se transformar em energia cinética, sendo directamente proporcional à erosividade da chuva (Mandala, 2016).

**Processamento dos dados:** Seguindo as recomendações de Mandala (2016), utilizou-se uma série histórica de 30 anos (1993-2023) para análise dos dados pluviométricos. Os dados foram obtidos do CRU TS v. 4.08 (Climatic Research Unit gridded Time Series), um conjunto de dados climáticos globais com resolução de 0,5°x0,5°, derivado da interpolação de dados mensais de extensas redes de estações meteorológicas terrestres (Harris et al., 2020).

O mapa de variabilidade espacial pluviométrica do distrito de Changara foi elaborado no ArcGIS Pro, utilizando o ModelBuilder com a ferramenta de Interpolação do Toolbox Spatial Analyst. O método de interpolação escolhido foi o IDW (Inverse Distance Weighted), devido à distribuição regular dos dados e sua característica de não estimar valores fora do intervalo dos dados de entrada, conforme recomendado por Covele (2022), Anexo 4.

**Cálculo da Intensidade Pluviométrica:** A intensidade pluviométrica (IP) foi calculada utilizando a relação entre a precipitação média anual (PMA) e a duração do período chuvoso (DPC), conforme a equação proposta por Crepani et al. (2001):

$$IP = PMA / DPC$$

Onde: **IP** - Intensidade pluviométrica; **PMA** - Precipitação Média Anual (mm); **DPC** - Duração do Período Chuvoso (meses). Baseando-se nos critérios do Centro Meteorológico Regional da Beira 2002, citado por Mandala (2016), considera-se como mês chuvoso aquele com precipitação igual ou superior a 60 mm.

De acordo com os dados obtidos do CRU TS v. 4.08, o período chuvoso no distrito de Changara dura até 4 meses (Dezembro a Março) (gráfico 1), com uma precipitação média anual de 637 mm, observada no período de 30 anos (1993 a 2023). Tabela 10 e figura 8D.

**Tabela 10:** Susceptibilidade a erosão hídrica do solo segundo factor I Pluviométrica.

| Classe grau de susceptibilidade | Distribuição espacial da precipitação | Intensidade Pluviométrica |
|---------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|
| 1 - Muito Baixa                 | 676,6 – 723,8                         | 169,2 – 179,5             |
| 2 - Baixa                       | 723,8 – 771,1                         | 179,5 – 188,6             |
| 3 - Moderada                    | 771,1 – 818,3                         | 188,6 – 200,9             |
| 4 - Alto                        | 818,3 – 865,5                         | 200,9 – 212,9             |
| 5 - Muito Alto                  | 865,5 – 912,7                         | 212,9 – 228,2             |
| Fonte: Autor                    |                                       |                           |

#### 4.2.2.2.3. Factor Erodibilidade do Solo

Pimentel (2006) destaca que a erosão ocorre quando o solo é exposto à força da chuva, que resulta no rompimento do equilíbrio natural do solo. entretanto Morgan (2005) destaca que embora a erosão de um solo decora por força da chuva, a resistência à erosão depende em parte da posição topográfica, da inclinação da encosta e da quantidade de perturbação, como durante a lavoura, e as propriedades do solo são os determinantes mais importantes. A erodibilidade varia com a textura do solo, estabilidade do agregado, resistência ao cisalhamento, capacidade de infiltração e conteúdo orgânico e químico. Desta forma neste estudo, foram consideradas características como tipo de solo, textura, permeabilidade e declividade, na definição das classes de erodibilidade. Na abordagem adoptada, solos com características diferentes, mas com erodibilidade similar, foram agrupados na mesma classe.

**Processamento dos dados:** Os dados de solo foram obtidos da carta de solos do território Moçambicano, em escala 1:2.000.000, publicada pelo Soil and Terrain Database for Southern Africa – International Soil Reference and Information Center. O processamento foi realizado no software ArcGIS Pro, seguindo estas etapas:

Conversão do vector do solo da área de estudo para raster e reclassificado em 5 classes para representar espacialmente a erodibilidade do solo no distrito de Changara, com base na avaliação da tabela 11, figura 8B.

**Tabela 11:** Erodibilidade baseada nas características do solo do distrito de Changara.

| CLASS FAO                                                   | SIMPL                                                       | Textura                                                        | Área % | Grau de Susceptibil | Justificativa                                                                                                                                                                                                        |
|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|--------|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Eutric Cambisol                                             | Solos de textura media deriva                               | Franco-argilo-arenoso castanho                                 | 1%     | 1 - Muito Baixa     | •Estes solos têm textura média e boa drenagem, o que favorece a infiltração da água e reduz o escoamento superficial. A profundidade moderada (>100cm) permite uma estabilidade do solo.                             |
| Ferric Lixisols                                             | Solos vermelhos de textura                                  | Franco-argilo-arenosos, castanho                               | 14%    | 2 - Baixa           | A boa drenagem e a textura franco-argilo-arenosa conferem uma boa estrutura ao solo, reduzindo a susceptibilidade à erosão.                                                                                          |
| •Eutric Leptosol;<br>•Eutric fLuvisol;<br>•Chromic Luvisol. | •Solos basálticos;<br>•Solos aluviões.<br>•Solos argilosos. | •Franco-argilo arenoso castanho escuro;<br>•Argiloso castanho. | 43%    | 3 - Moderada        | Apesar da boa drenagem em outras condições imperfeita a moderada e fertilidade moderada a alta, a pouca profundidade (<30cm) torna estes solos mais vulneráveis à erosão, especialmente em eventos de chuva intensa. |
| •Eutric Leptosol;<br>•Eutric Leptosol.                      | •Solos líticos;<br>•Solos riolíticos.                       | •Franco- arenoso, castanho;<br>•Franco-Argilo-arenosos.        | 9%     | 4 - Alta            | Solos muito rasos (0-30cm) em terreno montanhoso com drenagem excessiva são altamente susceptíveis à erosão. A água tende a escoar rapidamente, levando partículas do solo                                           |
| Cambic arenosol                                             | Solos arenosos                                              | Arenoso castanho acinzentado                                   | 33%    | 5 - Muito Alta      | Solos arenosos são naturalmente mais susceptíveis à erosão devido à baixa coesão entre as partículas. A drenagem excessiva e a baixa fertilidade aumentam                                                            |
| Fonte: adaptado de Mandala (2016) e (MEF & MITADER, 2015)   |                                                             |                                                                |        |                     |                                                                                                                                                                                                                      |

#### 4.2.2.2.4. Factor Declividade

Phinzi e Ngetar (2019) enfatizam a importância da declividade do terreno no controle da erosão e em processos geomorfológicos associados, como transporte e sedimentação relacionados à interação-escoamento. É consenso na literatura científica que áreas com inclinações mais acentuadas apresentam maior susceptibilidade à erosão hídrica (Seutloali & Beckedahl, 2015). Para este estudo, o factor declividade foi derivado de Modelo de Elevação Digital (DEM). O processamento foi realizado no software ArcGIS Pro, utilizando a ferramenta Slop, e foi reclassificado em 5 classes de susceptibilidade, tabela 12 figura 8C.

**Tabela 12:** Susceptibilidade a erosão hídrica do segundo factor declividade.

| Grau de susceptibil | Declividade | Designação                | Descrição a Erosão                                                                                                                                                                                                                                                           |
|---------------------|-------------|---------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1- Muito baixo      | (0% - 3%)   | Plano/ praticamente plano | •Corresponde a relevos planos ou quase planos, com formações superficiais espessas como, por exemplo, topos planos de chapadas, onde o escoamento superficial ou enxurradas (deflúvio) é muito lento e com efeitos de escoamento superficial quase invisível.                |
| 2- Baixa            | (3% - 8%)   | Suavemente ondulado       | •Corresponde a terrenos com declives suaves, com topografia ligeiramente movimentada, constituída por um conjunto de pequenas colinas e outeiros ou por sucessão de pequenos vales com densidade de drenagem grosseira e de fraca profundidade. o escoamento é lento a médio |

|                                   |            |                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|-----------------------------------|------------|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 3-Moderada                        | (8% - 12%) | Ondulado            | •Corresponde às áreas com superfícies inclinadas, geralmente com relevos ondulados, com densidade e profundidade média de drenagem, com formações superficiais pouco espessas ou ainda de relevos planos. Na maior parte dos solos, o escoamento superficial é médio a rápido, o que provoca a formação de canaletas.                                                                                                                                        |
| 4- Alta                           | (12% -20%) | Fortemente ondulado | •Corresponde às áreas de topografia relativamente movimentada, composta por colinas de tamanho médio e outeiros ou de interflúvios de pendente curtos formados por vales encaixados. São relevos muito inclinados ou colinosos onde o escoamento superficial é rápido na maior parte dos solos, a não ser que os declives sejam menos complexos. Os solos desta classe são facilmente erodíveis, com exceção daqueles muito permeáveis e não muito arenosos. |
| 5- Muito Alta                     | (20% -45%) | Montanhoso          | •Representam áreas fortemente inclinadas, com topografia movimentada, desníveis fortes e formadas por conjunto de outeiros ou morros ou por superfícies intercortadas por vales profundos, cujo escoamento superficial é muito rápido na maior parte dos solos.                                                                                                                                                                                              |
| Fonte: Adaptado de Mandala (2016) |            |                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |

#### 4.2.2.2.5. Factor Densidade de Drenagem

De acordo com Ebhuoma et al. (2022) este factor é particularmente relevante no estudo da susceptibilidade à erosão hídrica, pois está directamente relacionado com a capacidade de escoamento e transporte de sedimentos em cursos de água. Leopoldo et al. (2020) estabelece um limiar crítico para a densidade de drenagem, afirmando que áreas com valores superiores a 0,90 km<sup>2</sup> apresentam uma susceptibilidade significativamente maior à erosão do solo. Esta relação pode ser explicada pela maior proximidade dos cursos de água às encostas e margens, o que intensifica os processos erosivos nessas áreas.

**Processamento:** Para gerar o mapa de densidade de drenagem do distrito de Changara, foi cortado a rede hidrográfica da área de estudo utilizando a ferramenta Clip. O Cálculo da densidade de drenagem é através da ferramenta Density ► Line Density. O resultado foi calculado por unidade de km<sup>2</sup> e classificado em 5 classes, tabela 13 e figura 8E.

**Tabela 13:** Susceptibilidade a erosão hídrica do solo segundo factor densidade de drenagem.

| Classe grau de susceptibilidade              | Densidade de drenagem Km <sup>2</sup> |
|----------------------------------------------|---------------------------------------|
| 1 - Muito Baixa                              | 0,1 – 0,6                             |
| 2 - Baixa                                    | 0,6 – 0,8                             |
| 3 - Moderada                                 | 0,8 – 3,1 Limiar                      |
| 4 - Alto                                     | 3,1 – 4,5                             |
| 5 - Muito Alto                               | 4,5 – 8,8                             |
| Fonte: Autor adaptado Leopoldo et al. (2020) |                                       |



#### 4.2.2.3. Atribuição dos pesos pelo AHP

O método AHP (Analytic Hierarchy Process), desenvolvido por Saaty (1990), é aplicado neste estudo para desenvolver a matriz de comparação pareada para atribuição dos pesos a cinco factores determinantes da erosão hídrica do solo na área de estudo, segundo a seguinte ordem hierárquica de importância dos factores: Uso da terra, Solo, Declividade, Intensidade Pluviométrica e Densidade de Drenagem (MEF & MITADER, 2015) e (MICOA 2007).

Segundo Falcão (2013) e (Saha, 2021) o processo envolve os seguintes 7 Passos:

##### **Passo 1: Criação da matriz de comparação pareada**

Nesta etapa inicial, constrói-se a matriz quadrada 5x5 no Excel, onde tanto as linhas quanto as colunas representam os cinco factores determinantes da erosão hídrica do solo.

O preenchimento da matriz segue o princípio de comparação pareada, utilizando a escala fundamental de Saaty (1991), que varia de 1 a 9 tabela 14:

**Tabela 14:** Escala de comparação pareada do método AHP. Fonte: Saaty (1991).

| Valor   | Definição da Avaliação                             | Explicação                                                                                                             |
|---------|----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1       | Mesma importância                                  | As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo.                                                              |
| 3       | Importância pequena de uma sobre a outra           | A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação a outra.                                     |
| 5       | Importância grande ou essencial                    | A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação a outra.                                    |
| 7       | Importância muito grande ou demonstrada            | Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação a outra; sua dominação de importância é demonstrada na prática. |
| 9       | Importância absoluta                               | A evidência favorece uma atividade em relação à outra com o mais alto grau de certeza.                                 |
| 2,4,6,8 | Valores intermediários entre os valores adjacentes | Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições.                                                   |

Para cada par de factor, atribui-se um valor que representa a importância relativa de um factor sobre o outro:

- Na comparação entre Uso da Terra e Solo, atribuiu-se o valor 3, pois segundo (MEF & MITADER, 2015) o uso da terra é um pouco mais importante que o Solo na influência dos processos erosivos no distrito de Changara;
- Na diagonal principal da matriz, onde cada factor é comparado consigo mesmo, atribuiu-se o valor 1 (importância igual);

- As comparações inversas foram cumpridas com os valores recíprocos. Como o uso da terra vs solo é 3, então Solo vs. Uso da Terra é 1/3.

Este processo foi repetido até que todas as células da matriz fossem preenchidas, resultando em uma matriz completa de comparações pareadas, que serve como base para os cálculos subsequentes do método AHP tabela 15.

### Passo 2: Soma das linhas

Nesta etapa, realiza-se a soma dos valores em cada linha da matriz de comparação pareada criada no passo 1 (Saha, 2021). Este processo é fundamental para a normalização posterior e para o cálculo dos pesos relativos aos factores, que serão utilizados nas etapas subsequentes.

### Passo 3: Atribuição dos Pesos

De acordo com Falcão (2013) e Saha (2021) neste passo, realiza-se a normalização das somas obtidas no passo 2. Divide-se cada soma da linha pelo total das somas (57,33). Os resultados foram expressos em percentagem. Estes valores normalizados representam os pesos relativos de cada factor no processo de erosão hídrica do solo (Saha, 2021).

**Tabela 15:** Matriz de comparação pareada normalizada e pesos dos factores determinantes da erosão hídrica do solo no distrito de Changara. Fonte: Elaborado pelo Autor.

| AHP  |                | 1            | 2    | 3           | 4              | 5        | Passo 2         | Passo 3 |
|------|----------------|--------------|------|-------------|----------------|----------|-----------------|---------|
|      |                | Uso da Terra | Solo | Declividade | IPluviométrica | Drenagem | Soma das Linhas | Pesos   |
| 1    | Uso da Terra   | 1,00         | 3    | 5           | 7              | 9        | 25,00           | 44%     |
| 2    | Solo           | 1/3          | 1,00 | 3           | 5              | 7        | 16,33333        | 28%     |
| 3    | Declividade    | 1/5          | 1/3  | 1,00        | 3              | 5        | 9,533333        | 17%     |
| 4    | IPluviométrica | 1/7          | 1/5  | 1/3         | 1,00           | 3        | 4,67619         | 8%      |
| 5    | Drenagem       | 1/9          | 1/7  | 1/5         | 1/3            | 1,00     | 1,787302        | 3%      |
| Soma |                |              |      |             |                |          | 57,33           | 100%    |

### Passo 4: Razão de Consistência

Nesta etapa, calcula-se o produto vectorial entre as linhas da matriz original e o autovetor (pesos obtidos no passo 3) (Falcão, 2013). **Processo:** Multiplica-se cada linha da matriz original pelo vector de pesos normalizados, depois somam-se os resultados para cada linha.

$$[D \cdot W] = \Sigma (a_{ij} * w_j)$$

onde:  $a_{ij}$ - elementos da matriz original;  $w_j$ - pesos normalizados

#### Passo 5: Cálculo do lambda ( $\lambda$ )

Neste passo, calculou-se o autovalor lambda ( $\lambda$ ) para cada factor (Falcão, 2013). **Processo:**

Divide-se cada elemento do vector obtido no passo 4 pelo peso correspondente do factor.

Fórmula utilizada:

$$\lambda_i = (D * W) / W$$

Onde: (D \* W): elemento do vector calculado no passo 4 W: peso normalizado do factor correspondente tabela x.

#### Passo 6: Cálculo do $\lambda$ Máximo

Nesta etapa, calcula-se o  $\lambda$  máximo (lambda máximo), que é a média dos valores de  $\lambda$  obtidos no passo 5 (Falcão, 2013). **Processo:** Soma-se todos os valores de  $\lambda$  calculados no passo anterior e divide-se a soma pelo número de factores ( $n = 5$ ), **Fórmula:**

$$\lambda_{\max} = \text{Média } [D \cdot W] / W = (\Sigma \lambda_i) / n$$

**Resultado:**  $\lambda_{\max} = 5,372986$

O  $\lambda$  máximo é um parâmetro importante para avaliar a consistência das comparações pareadas. Quanto mais próximo  $\lambda_{\max}$  estiver do número de factores ( $n$ ), mais consistente é a matriz de comparação.

#### Passo 7: Cálculo da razão de consistência

Neste passo final, calcula-se a Razão de Consistência (RC) para avaliar a coerência das comparações pareadas (Falcão, 2013). Cálculo do Índice de Consistência (CI):

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$$

Onde:  $n$  = número de factores (5).  $CI = (5,372986 - 5) / (5 - 1) = 0,093247$

Obtenção do Índice Randômico (RI): Para  $n = 5$ , RI = 1,11 (valor tabelado). Tabela 17.

**Tabela 16:** Matriz de calculo da razão de consistência da matriz de comparação pareada.

|         | produto vectorial entre as linhas da matrix e o autovector |                                         |                                                                                        |                                                                |                                          |                                                  |
|---------|------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| n-facto | Passo 4                                                    | Passo 5                                 | Passo 6                                                                                | Passo 7                                                        | Passo 7                                  | Passo 7                                          |
|         | Produto Vectorial<br>$[D \cdot W] = \sum (a_{ij} * w_j)$   | Lambda<br>$\lambda_i = (D \cdot W) / W$ | Lambda maximo<br>$\lambda_{max} = Média$<br>$[D \cdot W] / W_n = (\sum \lambda_i) / n$ | Indice de Consistencia<br>$IC = (\lambda_{max} - n) / (n - 1)$ | Indice Randomico<br><b>RI (tabelado)</b> | Rc- Razao de Consistencia<br><b>RC = IC / RI</b> |
| 5       | 2,973752699                                                | 6,819429                                | 5,37394554                                                                             | 0,093486                                                       | 1,11                                     | <b>0,084222</b>                                  |
|         | 1,555180243                                                | 5,458698                                |                                                                                        |                                                                |                                          |                                                  |
|         | 0,749044798                                                | 4,504496                                |                                                                                        |                                                                |                                          |                                                  |
|         | 0,349797885                                                | 4,288527                                |                                                                                        |                                                                |                                          |                                                  |
|         | 0,180774129                                                | 5,798579                                |                                                                                        |                                                                |                                          |                                                  |

**Tabela 17:** Índice Randómico em função da ordem da matriz. Fonte: Colin (2007).

| n   | 1 | 2 | 3    | 4    | 5           | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
|-----|---|---|------|------|-------------|------|------|------|------|------|
| ICA | 0 | 0 | 0,52 | 0,89 | <b>1,11</b> | 1,25 | 1,35 | 1,40 | 1,45 | 1,49 |

Cálculo da Razão de Consistência (RC):

$$RC = CI / RI. \quad RC = 0,093247 / 1,11 = 0,084222$$

Resultado final: **RC = 0,084222**

O valor de **RC é menor que 0,1**, indicando que as comparações pareadas são consistentes e aceitáveis (Saaty e Vargas, 1991). Conforme Falcão, (2013) é valida a atribuição dos pesos aos factores determinantes da erosão hídrica.

#### 4.2.2.4. Integração dos Factores determinantes

De acordo com Saha (2021), após a padronização dos factores para um tamanho de célula uniforme (10x10), uniformização em 5 classes de susceptibilidade e aplicado o método AHP para atribuição dos pesos conforme a influência de cada factor no processo erosivo. É integrada os factores utilizando a ferramenta de sobreposição ponderada (Weighted Overlay) no software ArcGIS Pro. Desta forma obtém-se a avaliação final do potencial de erosão hídrica no distrito de Changara através da seguinte fórmula:

$$WO = (\text{Uso da terra} * 0,44) + (\text{Solo} * 0,28) + (\text{Declividade} * 0,17) + (\text{Intensidade Pluviométrica} * 0,08) + (\text{Densidade de Drenagem} * 0,03) = \text{Erosão Hídrica Potencial}$$

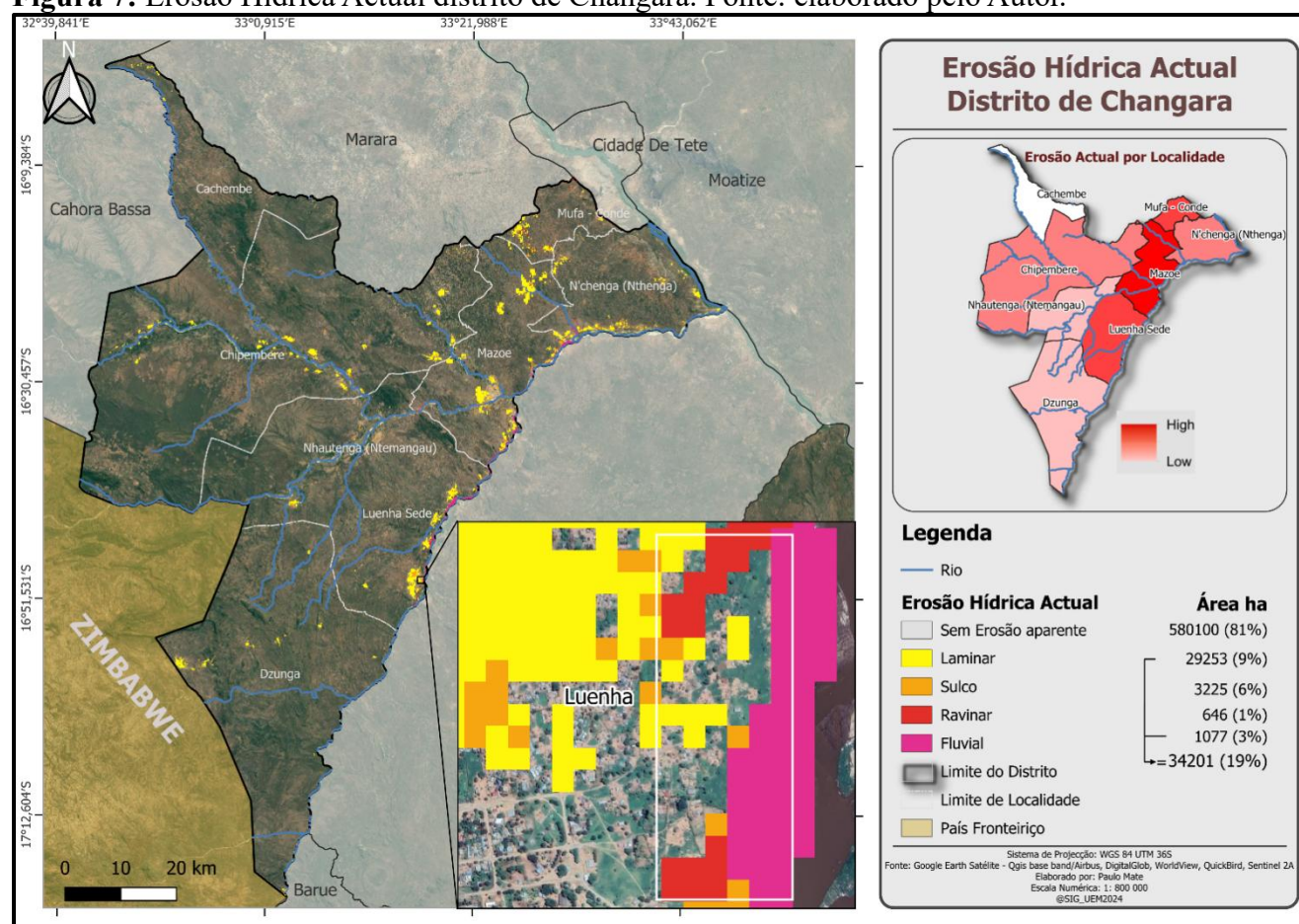
## V. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com os procedimentos metodológicos adoptadas para a avaliação da erosão hídrica Actual e Potencial em Changara, na secção anterior, neste apresentam-se os resultados alcançados e discussão.

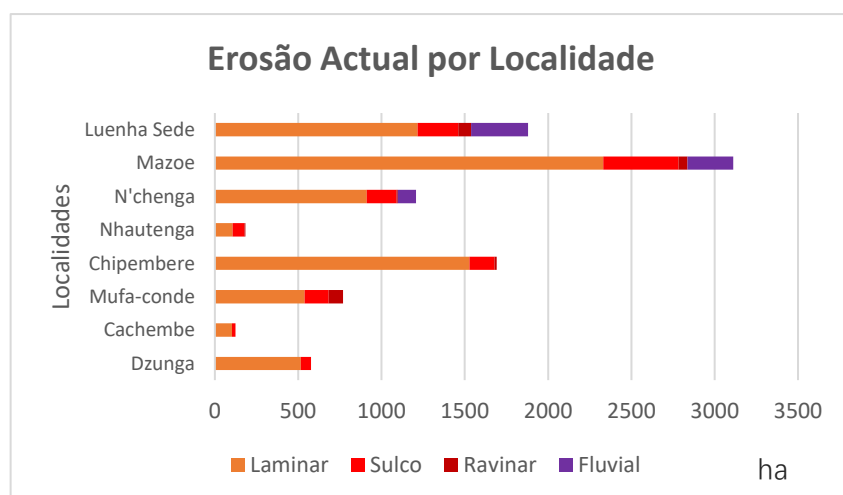
### 5.1. Resultados

#### 5.1.1. Erosão Hídrica Actual em Changara

**Figura 7:** Erosão Hídrica Actual distrito de Changara. Fonte: elaborado pelo Autor.



**Tabela 18:** Distribuição espacial por localidade e tipo de erosão hídrica actual em Changara.



| Tipo                   | Area em hectares | %           |
|------------------------|------------------|-------------|
| Sem erosão aparente -1 | 580100           | 81%         |
| Laminar -2             | 29253            | 9%          |
| Sulco -3               | 3225             | 6%          |
| Ravinar -4             | 646              | 1%          |
| Fluvial -5             | 1077             | 3%          |
| <b>Total</b>           | <b>614301</b>    | <b>100%</b> |

#### **5.1.1.1. Distribuição espacial e Tipos de erosão hídrica Actual em Changara**

A avaliação da erosão hídrica actual no Distrito de Changara revela que 19% (34 mil ha) da área total do distrito está afectada por processos erosivos (Figura 7, Tabela 18). A erosão laminar é o tipo predominante, ocupando 9% (29 mil ha) da área total do distrito, seguida pela erosão em sulco com 6% (3 mil ha), erosão fluvial com 3% (1.077 ha) e, por fim, a erosão em ravina, que afecta 1% (646 ha) da área. Em termos espaciais, observa-se uma concentração mais acentuada dos processos erosivos no Nordeste e Este do distrito, particularmente ao longo dos cursos de água, com maior destaque ao longo do rio Luenha e em áreas de declividade ondulado (Figura 7). É notável que 81% (580 mil ha) do território não apresenta erosão hídrica aparente.

#### **5.1.1.2. Distribuição espacial da erosão hídrica actual por localidade**

A avaliação da distribuição espacial da erosão por localidade (Figura 7b, mapa à direita; Gráfico 2) evidencia padrões distintos de erosão actual. Mazoe destaca-se como a localidade mais afectada, apresentando uma maior extensão de erosão laminar (2 mil ha) e em sulco (451 ha), além de uma presença significativa da erosão fluvial (275 ha). Chipembere e Luenha Sede também mostram áreas consideráveis afectadas pela erosão, com Chipembere apresentando (1.527 há) de erosão laminar e (149) ha de erosão em sulco, enquanto Luenha Sede exibe a maior área de erosão fluvial (341 ha) entre todas as localidades (gráfico 2). N'chenga apresenta áreas substanciais de erosão laminar (912,41 ha) e em sulco (178,55 ha). Em contrapartida, Cachembe emerge como a localidade menos impactada, com apenas (102) ha de erosão laminar e (20 há) em sulco. Dzunga, por sua vez, apresenta uma área significativa de erosão laminar (516 ha), mas é notável a ausência de erosão ravinar e fluvial nesta localidade. Estes resultados sugerem uma variabilidade espacial significativa na erosão hídrica actual no distrito.

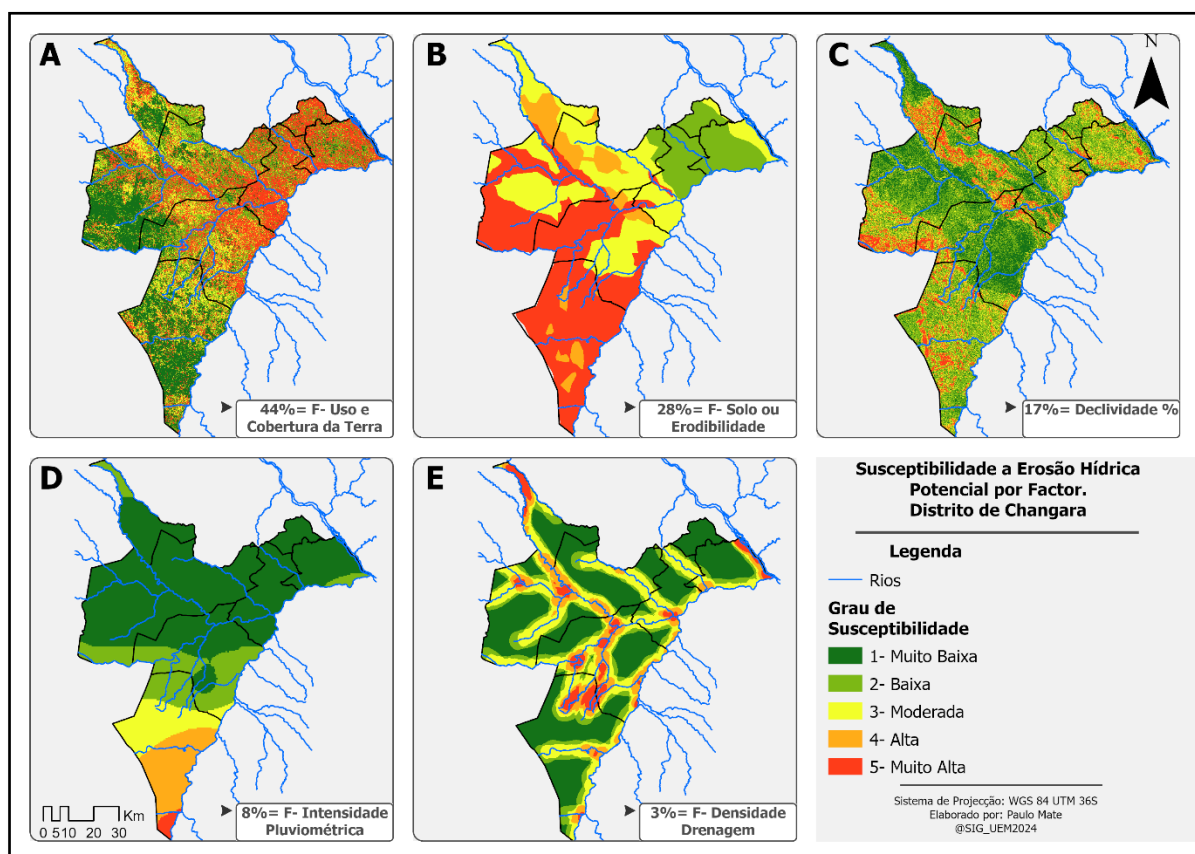


## 5.1.2. Erosão Hídrica Potencial em Changara

A avaliação do potencial de erosão hídrica no distrito de Changara revela a influencia de cinco factores principais, cada um contribuindo de forma distinta para a susceptibilidade erosiva.

### 5.1.2.1. Erosão Hídrica Potencial por Factor Determinante em Changara

**Figura 8:** Resultados por Factor Determinante de Erosão Potencial.



**Tabela 19:** Classificação de cada factor determinante em classes de susceptibilidade erosiva.

| Pesos                 | 44%                                                               |            | 28%                                                |            | 17%                               |            | 8%                                    |            | 3%                     |            |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------------|------------|----------------------------------------------------|------------|-----------------------------------|------------|---------------------------------------|------------|------------------------|------------|
| Grau de Susceptibilid | Uso e Cobertura da Terra                                          | Mil ha.    | Solo                                               | Mil ha     | Declividade %                     | Mil ha     | Intensidade Pluviométrica (mm/h-mês)  | Mil ha     | Densidade Drenagem km² | Mil ha     |
| <b>1- Muito baixo</b> | Floresta aberta de baixa altitude; Matagal Aberto; Moita Arbustos | 161        | Solos de textura media deriva                      | 0.279      | (0% - 3%)                         | 154        | 169,2 – 179,5                         | 398        | 0,1 – 0,6              | 280        |
| <b>2- Baixa</b>       | Formação herbácea arborizada.                                     | 140        | Solos vermelhos de textura                         | 80         | (3% - 8%)                         | 256        | 179,5 – 188,6                         | 103        | 0,6 – 0,8              | 86         |
| <b>3- Moderada</b>    | Formação herbácea.                                                | 103        | Solos basálticos; Solos aluviões; Solos argilosos. | 18         | (8% - 12%)                        | 87         | 188,6 – 200,9                         | 50         | 0,8 – 3,1              | 147        |
| <b>4- Alta</b>        | Cultivado de Sequeiro.                                            | 6          | Solos líticos; Solos riolitos.                     | 55         | (12% -20%)                        | 59         | 200,9 – 212,9                         | 56         | 3,1 – 4,5              | 67         |
| <b>5- Muito Alta</b>  | Solo sem Vegetação; Área Habitacional                             | <b>202</b> | Solos arenosos                                     | <b>181</b> | (20% -45%)                        | <b>56</b>  | 212,9 – 228,2                         | <b>5</b>   | 4,5 – 8,8              | <b>32</b>  |
| <b>Fonte</b>          | MITADER (2015), Classificação Supervisionada                      |            | MITADER (2015),                                    |            | INIA e UEM (1995); Mandala (2016) |            | Mandala (2016) Leopoldo et al. (2020) |            | Leopoldo et al. (2020) |            |
| <b>Total</b>          |                                                                   | <b>614</b> |                                                    | <b>614</b> |                                   | <b>614</b> |                                       | <b>614</b> |                        | <b>614</b> |

**Factor Uso e Cobertura da Terra (peso 46%, figura 8A, tabela 19A):** A avaliação identificou 202 mil hectares de áreas altamente susceptíveis, reflectindo a pressão antrópica sobre a vegetação natural. corroborando com as observações do MEF & MITADER, (2015) esta susceptibilidade esta relacionada com práticas como agricultura itinerante, assentamentos humanos e sobre-pastoreio, que aceleram os processos erosivos através da exposição do solo. O contraste sublinha o papel crucial da vegetação na interceptação das gotas de chuva, na estabilização do solo pelas raízes e na facilitação da infiltração, mesmo em condições de alta susceptibilidade do solo e intensidade pluviométrica elevada, a cobertura vegetal proporciona a protecção natural.

**Erodibilidade do Solo (peso 28%, figura 8B, tabela 19B):** A erodibilidade do solo emerge como o segundo factor mais influente na avaliação do potencial da erosão hídrica, com 181 mil hectares classificados como altamente susceptíveis. Estas áreas concentram-se nas regiões central e sul do distrito, onde predominam solos arenosos. Esta observação alinha-se com as constatações do MEF & MITADER, (2015) que destaca estes solos como particularmente propensos à erosão devido à sua baixa coesão entre as partículas. A textura arenosa, caracterizada por grãos maiores e menos agregados, facilita o desprendimento e transporte de partículas pelo escoamento superficial, aumentando significativamente a susceptibilidade.

**Declividade (peso 17%, figura 8C, tabela 19C):** A avaliação revela 56 mil hectares classificados como altamente susceptíveis à erosão hídrica. Essas áreas observam-se em zonas com declives entre 12% e 20% (fortemente ondulado) e 20% a 45% (montanhoso). Nestas zonas, o relevo acentuado intensifica o escoamento superficial, acelerando o transporte e a deposição de sedimentos. Esta observação corrobora os princípios geomorfológicos discutidos por Morgan (2005) e Ngetar (2019), enfatizando o papel fundamental da topografia na dinâmica erosiva.



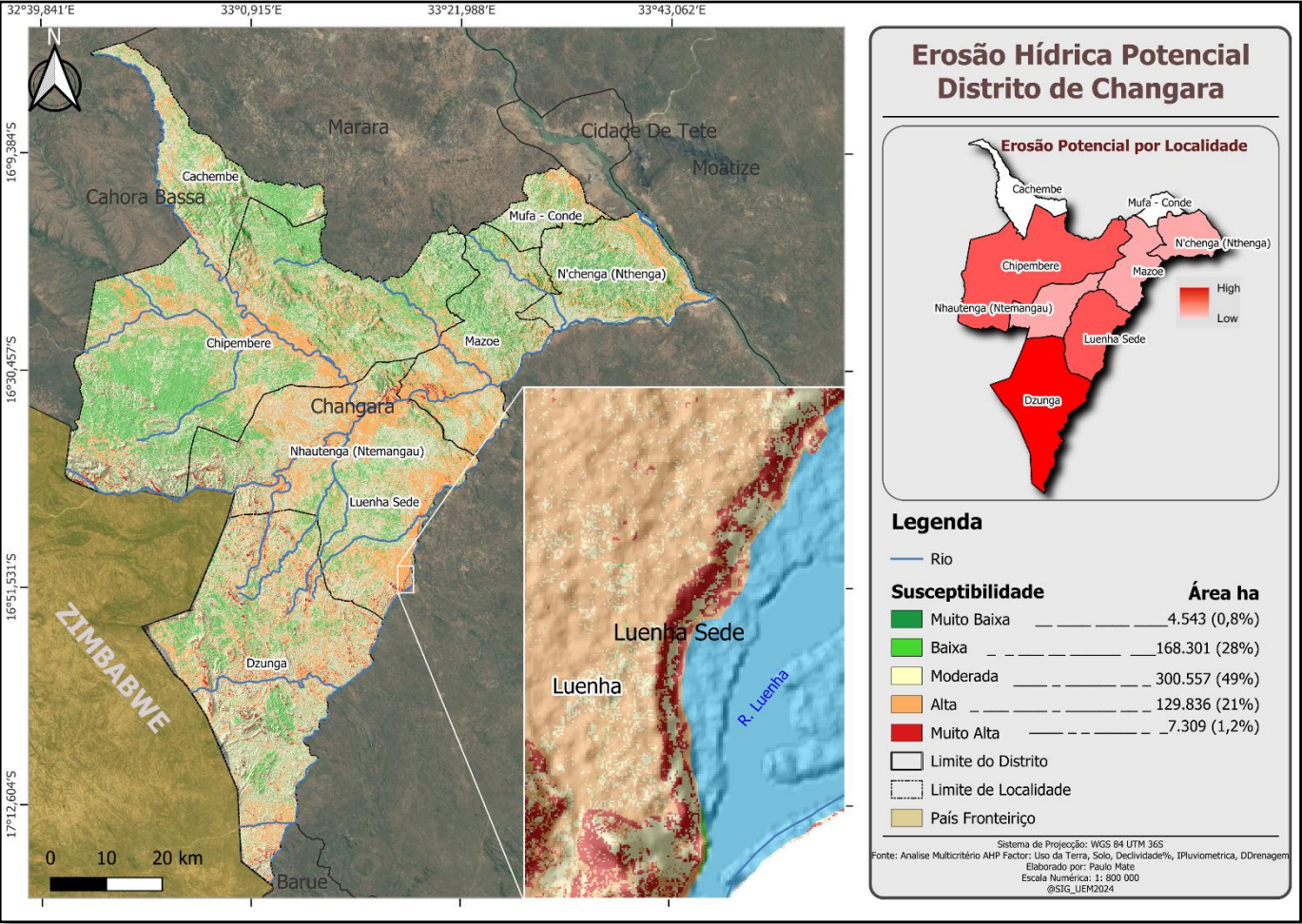
**Intensidade Pluviométrica (peso 8%, figura 8D, tabela 19D):** Apesar de seu papel fundamental no desencadeamento do processo erosivo, a intensidade pluviométrica tem um peso relativamente baixo na avaliação global, com 5 mil hectares classificados como altamente susceptíveis. Essas áreas são aquelas que apresentam alta intensidade pluviométrica (212,9 - 228,2 mm), sendo que de acordo com Mandala (2016), quanto mais intenso a chuva, mais susceptível será aquela zona. O clima BSh do distrito, caracterizado por um período chuvoso concentrado de 4 meses, resulta em uma distribuição pluviométrica relativamente homogênea, moderando sua influência geral nos processos erosivos.

**Densidade de Drenagem (peso 3%, figura 8E tabela 19E):** Com 56 mil hectares avaliados como altamente susceptíveis, este factor, embora com peso menor, é significativo em áreas de limiar superior a 0,9 km<sup>2</sup>, estabelecido Leopoldo et al. (2020). A predominância de cursos de água explica a sua influência localizada, nas áreas ribeirinhas, especialmente ao longo dos rios perenes, a erosão fluvial emerge como um processo directamente relacionado com a capacidade de escoamento e transporte de sedimentos.

#### **5.1.2.2. Integração dos Factores determinantes**

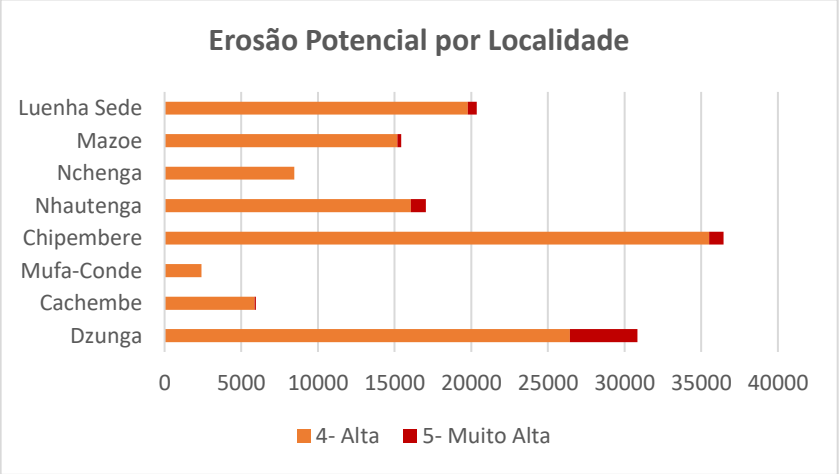
A integração dos cinco factores determinantes da erosão hídrica potencial no distrito de Changara foi realizada através do Weighted Overlay. Este processo combinou os cinco mapas utilizando os pesos atribuídos pela análise multicritério AHP. Esta abordagem permitiu a síntese das múltiplas variáveis em um único mapa, proporcionando uma avaliação holística da susceptibilidade à erosão hídrica no distrito. O resultado desta integração é um mapa (figura 9) que reflecte a influência combinada de todos os factores, oferecendo uma visão do potencial erosivo em toda a extensão do distrito de Changara.

**Figura 9: Erosão Hídrica Potencial com Factores Integrados.** Fonte: elaborado pelo autor.



**Tabela 20: Erosão Hídrica Potencial Distrito de Changara e Por Localidade.**

| Distrito de Changara |         |      |
|----------------------|---------|------|
| Susceptibilidade     | Área ha | %    |
| 1-Muito Baixa        | 4.543   | 0,8  |
| 2- Baixa             | 168.301 | 28   |
| 3-Moderada           | 300.557 | 49   |
| 4- Alta              | 129.836 | 21   |
| 5- Muito Alta        | 7.309   | 1,2  |
| Total                | 610.546 | 100% |
| Fonte                | Autor   |      |



**5.1.2.3. Distribuição espacial da erosão hídrica Potencial em Changara**

A avaliação da distribuição espacial da erosão hídrica potencial no distrito de Changara revela que o território é dominado por áreas de susceptibilidade moderada, que abrangem 300 mil hectares (49%), formando uma matriz central que se estende por grande parte do distrito. As

zonas de baixa susceptibilidade ocupam 168 mil hectares (28%), concentrando-se principalmente nas regiões Oeste e Norte, onde o relevo tende a ser irregular e a cobertura vegetal mais preservada. As áreas de alta susceptibilidade, cobrem 129 mil hectares (21%), formam um cinturão proeminente que se estende do centro-Sul ao Sudeste do distrito, coincidindo com regiões de topografia mais irregular. As zonas de muito alta susceptibilidade, embora ocupem apenas 7 mil hectares (1,2%), destacam-se pela sua distribuição crítica ao longo das margens do rio Luenha e suas principais afluentes e em áreas com declividade ondulada e fortemente ondulada, evidenciando a susceptibilidade acentuada das áreas ribeirinhas. A região de muito baixa susceptibilidade são as menos expressivas, com 4 mil hectares (0,8%), aparecendo em pequenas extensões dispersas, principalmente na porção Oeste e Norte do distrito. Esta configuração espacial reflecte a interacção complexa entre os factores geomorfológicos, hidrológicos e antrópicos, ressaltando a importância de uma avaliação multicritério, multidisciplinar e holística na avaliação da erosão hídrica potencial.

#### **5.1.2.4. Distribuição espacial da erosão hídrica Potencial por Localidade**

A distribuição espacial da erosão hídrica potencial por localidade no distrito de Changara revela padrões diferentes de susceptibilidade (Figura 9B, mapa à direita, gráfico 3). Dzunga emerge como a localidade mais vulnerável, com maior extensão de áreas de alta (26.444 ha) e muito alta (4.401 ha) de susceptibilidade. Chipembere segue como segunda mais crítica, apresentando 35.506 ha de alta e 951 ha de muito alta susceptibilidade. Luenha Sede, apesar de áreas menores, apresenta concentração significativa de zonas críticas (19.781 ha de alta e 571 ha de susceptibilidade muito alta), devido à sua proximidade com o rio Luenha em grande parte.

Esta variabilidade espacial reflecte a interacção entre factores naturais e antrópicos em cada localidade do distrito.

## **5.2. Discussão dos Resultados**

### **5.2.1. Erosão hídrica Actual em Changara**

A avaliação da erosão hídrica actual no distrito de Changara revela uma relação entre os padrões de uso da terra e os processos erosivos observados. Com 19% da área total afectada por erosão, destaca-se a influência significativa das práticas agrícolas, e de ocupação do solo na erosão hídrica actual. A predominância da erosão laminar (9%) e em sulco (6%) está directamente ligada à agricultura itinerante de sequeiro, praticada por aproximadamente 80% da população (MEF & MITADER, 2015). Esta forma de agricultura, caracterizada pela ausência de práticas de conservação do solo e pela exposição periódica do terreno na rotação de culturas, cria condições propícias para o início e a progressão dos processos erosivos. Este padrão é consistente com as observações do MEF & MITADER, (2015). A distribuição espacial da erosão, concentrada no Nordeste e Este do distrito, particularmente ao longo dos cursos de água como o rio Luenha, reflecte não apenas a influência da rede hidrográfica, mas também os padrões de assentamentos humanos. A ocupação próxima aos rios e a abertura de machambas nas margens cria pressão sobre a cobertura vegetal, que serve de barreira natural contra a progressão da erosão fluvial, que afecta 3% da área do distrito. Esta observação está em consonância com MEF & MITADER, (2015) que destaca a pressão exercida pela ocupação humana nas zonas ribeirinhas. A variabilidade na distribuição da erosão entre as localidades do distrito reforça a relação entre uso da terra e processos erosivos. Por exemplo, Mazoe, a localidade mais afectada, apresenta extensas áreas de erosão laminar e em sulco, provavelmente devido à maior proporção de áreas de solo exposto e cultivado de sequeiro. Estes resultados estão alinhados com estudos anteriores, como o Plano de Acção do MICOA (2007) e o MEF & MITADER, (2015) que identificam a agricultura itinerante, o desmatamento e o sobre pastoreio como factores principais que influenciam os processos erosivos em Changara.

### **5.2.2. Erosão hídrica Potencial em Changara**

A avaliação do potencial de erosão hídrica no distrito de Changara revela um sistema complexo e dinâmico, onde os cinco factores determinantes (uso e cobertura da terra, erodibilidade do solo, declividade, intensidade pluviométrica e densidade de drenagem), interagem de forma sinérgica, criando um mosaico de susceptibilidade erosiva variável ao longo do território. O uso e cobertura da terra emerge como o factor primordial, actuando como um modulador dos efeitos dos demais factores. Nas áreas de alta susceptibilidade (7 mil ha), predominantemente caracterizadas por solo exposto, assentamentos humanos e cultivos de sequeiro, observa-se uma amplificação dos efeitos erosivos devido à exposição do solo pela agricultura de sequeiro sem manejo adequado, à desflorestação e ao sobrepastoreio. Esta situação é agravada pela erodibilidade do solo, que actua em estreita relação com o uso da terra. Nas áreas de alta susceptibilidade, em zonas com solos arenosos e fraco-arenosos, a interacção com práticas agrícolas sem observância de manejo do solo cria um cenário de alta susceptibilidade. A baixa coesão dos solos, quando expostos pela remoção da cobertura vegetal, torna-os extremamente susceptíveis à acção erosiva da chuva e do escoamento superficial.

A declividade, embora terceira em importância, desempenha um papel crucial na intensificação dos processos erosivos iniciados pelos dois primeiros factores. Nas áreas de alta susceptibilidade, a prática da agricultura e remoção da cobertura vegetal em regiões de solos arenosos e franco-arenosos, em terrenos ondulados e montanhosos faz com que a relevo acentuado actue como um escorregadio, acelerando o escoamento superficial e, consequentemente, o transporte de sedimentos desconsolidados. Esta interacção é particularmente notável nas encostas do rio Luenha e seus afluentes, onde a combinação de declives acentuados, solos erodíveis e uso intensivo da terra cria zonas altamente susceptíveis à erosão. A intensidade pluviométrica, apesar de seu peso relativamente baixo, desempenha um

papel fundamental como agente desencadeador de processos erosivos. Nas áreas de alta susceptibilidade, principalmente na região sul do distrito, a maior intensidade das chuvas actua como um amplificador dos efeitos dos outros factores. Em zonas de solo exposto e declive acentuado, por exemplo, chuvas intensas tendem a desencadear processos erosivos severos, mesmo em áreas relativamente estáveis. Por fim, a densidade de drenagem, embora com o menor peso, exerce uma influência localizada, mas significativa. Nas áreas de alta susceptibilidade ao longo dos principais cursos de água, este factor interage de forma complexa com os demais. A proximidade dos rios não apenas intensifica a erosão fluvial, mas também aumenta a capacidade de transporte de sedimentos erodidos de áreas adjacentes. Esta interacção é particularmente evidente nas margens do rio Luenha e nos seus principais afluentes, onde o escoamento superficial em solos erodíveis cria zonas de alta susceptibilidade à erosão.

A integração desses 5 factores resulta em um padrão de susceptibilidade onde 137 mil hectares (22,3%) do distrito apresenta alta e muito alta susceptibilidade à erosão hídrica. Este padrão reflecte a convergência espacial de condições críticas de todos os factores avaliados. As localidades de Dzunga, Chipembere e Luenha Sede emergem como áreas mais susceptíveis a erosão hídrica, devido à combinação particularmente desfavorável de factores erosivos. A predominância de áreas de susceptibilidade moderada (49% do distrito) sugere um equilíbrio delicado entre os factores erosivos e a resistência natural do terreno. Estas áreas representam zonas de transição, onde pequenas alterações em qualquer dos factores, especialmente no uso da terra, podem desencadear um aumento significativo na susceptibilidade erosiva.

Esta avaliação multifactorial e integrada da erosão hídrica potencial em Changara oferece uma visão mais nuançada e dinâmica dos processos erosivos no distrito. Ela revela não apenas a importância individual de cada factor, mas também como suas interacções podem criar efeitos sinérgicos que amplificam ou, em alguns casos, atenuam o potencial erosivo. Desta forma os

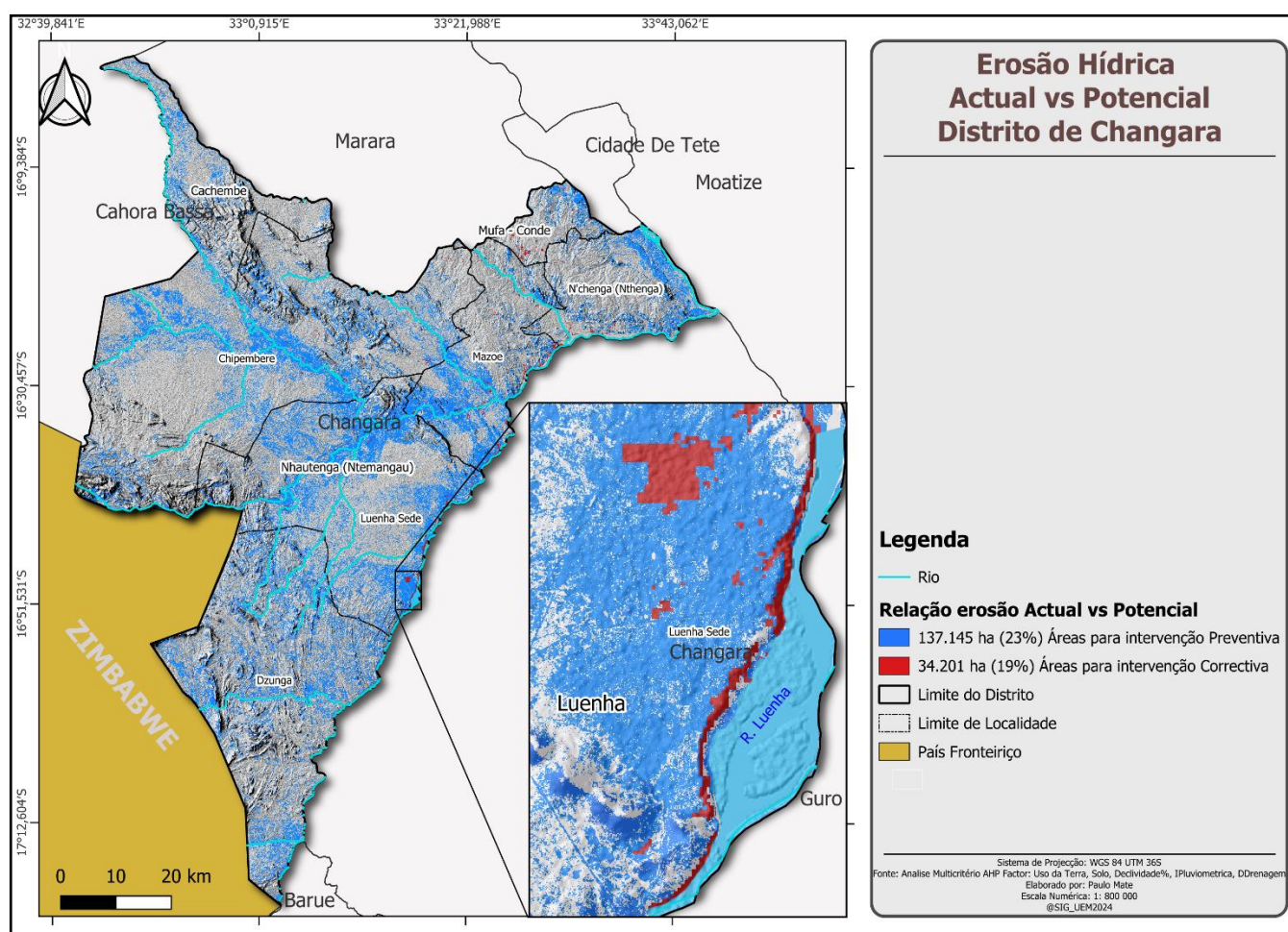


resultados obtidos sublinham a necessidade de uma abordagem holística e integrada na gestão do risco de degradação do solo por erosão hídrica no distrito de Changara.

### 5.3. Relação entre a Erosão hídrica Actual e Potencial em Changara

Para uma avaliação abrangente da situação erosiva no distrito de Changara, é fundamental estabelecer a relação entre a erosão hídrica Actual e Potencial (Menese, 2011) e (Covele, 2022). Esta relação visa identificar as áreas mais críticas e prioritárias para intervenção, tanto para desacelerar o avanço da erosão em áreas já afectadas quanto para implementar medidas preventivas em zonas de alto potencial erosivo. Efectuou-se a sobreposição dos mapas de forma a realçar a combinação das áreas de ocorrência de erosão em sulco, ravinar e fluvial com a erosão potencial alta a muito alta (figura 10), e a comparação lado a lado das áreas em hectares dos dois mapas (tabela 20).

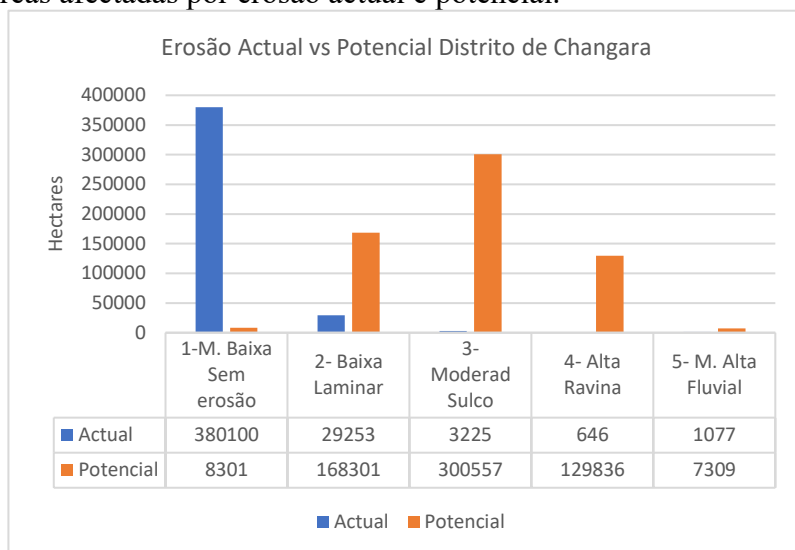
**Figura 10:** Sobreposição entre a erosão hídrica Actual com Potencial.





**Tabela 21:** Comparação lado a lado das áreas afectadas por erosão actual e potencial.

| Distrito de Changara |               |                  |               |
|----------------------|---------------|------------------|---------------|
| Erosão Actual        |               | Erosão Potencial |               |
| Tipo de Erosão       | Area ha       | Susceptibilidae  | Area ha       |
| Sem erosao           | 580100        | 1- Muito Baixa   | 8301          |
| Laminar              | 29253         | 2- Baixa         | 168301        |
| Sulco                | 3225          | 3- Moderad       | 300557        |
| Ravina               | 646           | 4- Alta          | 129836        |
| Fluvial              | 1077          | 5- Muito Alta    | 7309          |
| <b>Total</b>         | <b>614301</b> |                  | <b>614304</b> |



## Relação

Existe uma relação entre a erosão Actual com Potencial em Changara (figura 10). onde apresenta-se susceptibilidade erosiva, há sempre ocorrência de erosão actual, esta observação corrobora com as observações feitas por Covele (2022), na avaliação de erosão hídrica real e potencial na Cidade de Pemba. A erosão actual em sulco abrange 3 mil ha, enquanto a susceptibilidade moderada abrange 300 mil ha, indicando um risco substancial de expansão da erosão em sulco, principalmente em áreas de declive acentuado e nas áreas de solo sem vegetação, agricultura de sequeiro e assentamentos humanos. A erosão em ravina (646 ha) contrasta com 129 mil ha de alta susceptibilidade, sinalizando um potencial para formação de novas ravinas, especialmente em zonas de solos erodíveis, declividade ondulada, intensidade pluviométrica e remoção da cobertura vegetal. A erosão fluvial (1.077 ha) relacionada à muito alta susceptibilidade (7.309 ha) sugere a possibilidade de agravamento da erosão fluvial ao longo dos cursos de água. Esta relação revela que, apesar da erosão actual afectar 34 mil ha (19%), há um potencial muito maior de erosão hídrica, com 137 mil ha (23%) classificado como alta e muito alta susceptibilidade. Isso indica a necessidade urgente de implementar estratégias de conservação do solo em grande escala, com foco em medidas preventivas em áreas de alta susceptibilidade ainda não severamente erodidas, e medidas reactivas ou correctivas em áreas já afectadas, especialmente em zonas de erosão em ravina e fluvial.

## **VI. CONCLUSÃO**

### **6.1. Conclusão**

A avaliação da distribuição espacial da erosão hídrica actual e potencial no Distrito de Changara revelou padrões diferentes e significativos. A avaliação da erosão actual revelou que 19% da área total do Distrito está afectada por processos erosivos, com predominância de erosão laminar (9%), seguida pela erosão em sulco (6%), erosão fluvial (3%) e erosão em ravina (1%). Espacialmente, estes processos concentram-se principalmente no Nordeste e Este do Distrito, com destaque para as margens do rio Luenha, na localidade de Mazoe e Luenha-sede em áreas de declive ondulado e solos arenosos sem cobertura vegetal.

A avaliação do potencial de erosão, realizada através da integração dos cinco factores determinantes, demonstrou que 22,3% do Distrito apresenta alta e muito alta susceptibilidade à erosão hídrica. O uso e cobertura da terra emerge como o factor mais influente, actuando como modulador dos demais factores. Em áreas onde a cobertura vegetal foi removida para agricultura itinerante, a erodibilidade natural dos solos arenosos é amplificada, especialmente quando combinada com declividades acentuadas. Esta interacção é intensificada pela intensidade pluviométrica.

A relação entre erosão actual com potencial permitiu constatar que as áreas com susceptibilidade alta a muito alta coincidem com áreas que já ocorre a erosão em sulco, ravinar e fluvial. As localidades mais afectadas tanto por erosão actual como por potencial erosivo são as localidades em hierarquia Mazoe, Luenha-sede, Dzunga, N'chenga, Mufa-conde, Chipembere, Nhautenga e por último Cachembe. Nas zonas que já apresentam erosão em sulcos, ravinar e fluvial (34 mil hectares), são necessárias medidas correctivas ou de recuperação que visam a desaceleração do avanço e a evolução dos estágios erosivos. Por outro lado, as áreas com alta a muito alta susceptibilidade ainda não severamente erodidas (134 mil

hectares) necessitam de medidas preventivas, principalmente em regiões de agricultura de sequeiro e zonas ribeirinhas, que visam a preservação e manejo do solo.

O presente estudo fornece uma base científica sólida para a compreensão e gestão do solo face a degradação por erosão hídrica em Changara, preenchendo a lacuna crítica de informações identificadas no Plano de Acção para a Prevenção e Controle da Erosão de Solos 2008-2018 e no MEF & MITADER, (2015). A metodologia integrada, combinando sensoriamento remoto, trabalho de campo, SIG e análise multicritério, mostrou-se eficaz na avaliação detalhada dos processos erosivos, oferecendo uma abordagem sistemática, multifactorial e multidisciplinar que pode ser replicada em outras regiões com características semelhantes.

## **6.2. Recomendações**

Tendo em vista os resultados obtidos neste estudo, são recomendados procedimentos metodológicos e algumas recomendações na tentativa de adopção de medidas correctivas e preventivas de mitigação dos problemas observados no distrito de Changara são propostas:

- Estabelecer faixas de protecção vegetal com largura mínima de 80 metros ao longo do rio Luenha e seus principais afluentes, em áreas identificadas com erosão fluvial;
- Implementar práticas de conservação do solo nas áreas de agricultura de sequeiro, incluindo cultivo em curvas de nível, rotação de culturas principalmente nas zonas de solos arenosos;
- Priorizar a estabilização das ravinas na sede do distrito, Luenha, onde mais de 500 famílias estão em risco, através de replantio de espécies de rápido crescimento adaptado ao local;
- Desenvolver programas de capacitação para agricultores locais sobre práticas conservacionistas de manejo do solo, considerando que 87% da população depende da agricultura;
- Evitar o desmatamento e a agricultura itinerante em áreas com declividade superior a 12%, especialmente próximas aos cursos de água.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arnoldus, HMJ (1974). *Erosão do solo: Uma revisão de processos e técnicas de avaliação*. Roma: FAO/AGL.SD.
- Barros, SHA (2005). *Estudo dos solos da região metropolitana de Fortaleza para aplicação na Engenharia Rodoviária* (Dissertação de mestrado). Departamento de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP.
- Bastos, BCA, Dias, RD, Gehling, JMW, & Milititsky, J. (2001). Estudo sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados a partir de propriedades geomecânicas. *Teoria e Práticas da Engenharia Civil*, 2, 9-18.
- Bertoni, J. e Lombardi Neto, F. (1999). *Conservação do solo* (4ª ed.). São Paulo: Ícone.
- Bertoni, J. e Lombardi Neto, F. (2012). *Conservação do solo* (8ª ed.). São Paulo: Ícone.
- Boardman, J. (2016). O valor do Google Earth™ para mapeamento de erosão. *Catena*, 143, 123-127. doi:10.1016/j.catena.2016.03.031
- Bui, TD, Lofman, O., Revhaug, I., & Dick, O. (2011). Análise de suscetibilidade a deslizamentos de terra na província de Hoa Binh, no Vietnã, usando índice estatístico e regressão logística. *Natural Hazards*, 59, 1413-1444.
- Carvalho Lima, K., Lupinacci, CM, Dantas Moreira Gomes, D., Oliveira Souza, S., & da Silva Alexandre, F. (2023). Erosão em áreas suscetíveis à desertificação no Semiárido: possibilidades de análise por meio da cartografia geomorfológica baseada em imagens de altíssima resolução. *Revista Brasileira De Geomorfologia*, 24(2). <https://doi.org/10.20502/rbg.v24i2.2319>
- Carvalho, JC (2006). *Processos Erosivos no Centro Oeste Brasileiro*. Brasília: FINATEC.
- Carvalho, JC e Diniz, NC (2011). *Cartilha de Erosão*. Brasília: Universidade de Brasília/FINATEC.
- Cassol, EA e Lima, VS (2003). Erosão em entressulcos sob diferentes tipos de preparo e manejo do solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 38, 117-124.
- Covele, PA (2022). *Consultoria para fornecer orientação científica sobre um estudo de causas e extensão da erosão usando SIG e sensoriamento remoto*. Maputo: PNUD Moçambique – Laboratório Acelerador.
- Crepani, E., Medeiros, JS, & Palmeira, A. (2004). *Intensidade pluviométrica: uma maneira de tratar dados pluviométricos para análise da vulnerabilidade de paisagens à perda de solo*. São José dos Campos: INPE.
- Crepani, E., Medeiros, JS, Hernandez Filho, P., Florenzano, TG, Duarte, V., & Barbosa, CCF (2001). *Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicado ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial*. São José dos Campos: INPE.

- Cumbane, BL (2012). *Aplicação de Sistemas de Informação Geográfica para a determinação do Potencial Natural de Erosão dos solos no Distrito de Sussundenga – Moçambique* (Dissertação de mestrado). Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Cunha, NO, Simão, PM, Silva, GFL, & Bacani, VM (2020). Análise multitemporal das mudanças de uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do córrego da Porteira em Aquidauana – MS. *Revista Pantaneira*, 18(Edição Especial).
- Ebhuoma, O., Gebreslasie, M., Ngetar, NS, Phinzi, K., & Bhattacharjee, S. (2022). Mapeamento da vulnerabilidade à erosão do solo em comunidades rurais selecionadas da bacia hidrográfica de uThukela, África do Sul, usando a hierarquia analítica. *Sistemas Terrestres e Meio Ambiente*, 6, 851-864. <https://doi.org/10.1007/s41748-022-00308-y>
- Evangelista, PP (1987). *Remote sensing application to soil degradation, evaluation and monitoring*. Trabalho apresentado no 4th UN/WMO/FAO/ESA International Training Course on Remote Sensing Application to Operational Agro-meteorology, Jacarta.
- Falcão, CE (2013). *Análise de riscos à degradação ambiental utilizando avaliação multicritério espacial, no município de Boa Vista-PB* (Tese de doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.
- Falcão, KS, & Leite, EF (2018). Avaliação do potencial natural à erosão hídrica na bacia do rio Nioaque. *Revista Geoaraguaia*, 8(3), 56-63. Recuperado de <http://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/geo/article/view/7792/pdf>
- Fragassi, PFM (2001). *Estudo da Erodibilidade dos Solos Residuais de Gnaiss da Serra de São Geraldo e de Viçosa* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- Goudie, A. (2013). *Geomorfologia Árida e Semi-Árida*. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511794261>
- Harris, I., Osborn, TJ, Jones, P., Lister, D., Osborn, T., Simpson, I., ... & Pereira, H. (2020). Versão 4 do conjunto de dados climáticos multivariados de alta resolução mensal CRU TS. *Dados Científicos*, 7(109). <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>
- Instituto Nacional de Estatística. (2017). *Resultados definitivos censo 2017: IV Recenseamento Geral da População e Habitação*. Maputo: INE.
- Jia, K., Wei, X., Gu, X., Yao, Y., Xie, X., & Li, B. (2014). Classificação da cobertura do solo usando dados do Landsat 8 Operational Land Imager em Pequim, China. *Geocarto International*, 29. <https://doi.org/10.1080/10106049.2014.894586>
- Julião, RP, Nery, F., Ribeiro, JL, Branco, MC, & Zêzere, JL (2009). *Guia Metodológico para a Produção de Cartografia Municipal de Risco e para a Criação de Sistemas de Informação Geográfica de Base Municipal*. Lisboa
- Kachouri, S., Achour, H., Abida, H., & Bouaziz, B. (2014). Mapeamento de risco de erosão do solo usando o Processo de Hierarquia Analítica e regressão logística: um estudo de caso da bacia hidrográfica de Haffouz, Tunísia central. *Arabian Journal of Geosciences*. <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1464-1>

- Lal, R. (1988a). *Métodos de pesquisa de erosão do solo*. Ankeny: Soil and Water Conservation Society.
- Lal, R. (1988b). Erodibilidade e erosividade. Em R. Lal (Ed.), *Métodos de pesquisa de erosão do solo* (pp. 141-160). Washington: Soil and Water Conservation Society.
- Leopold, LB, Wolman, MG, Miller, JP e Wohl, E. (2020). *Processos fluviais em geomorfologia*. Nova York: Publicações Courier Dover.
- Lima, GSA (1987). *Seleção de áreas para implantação de aterros sanitários: uma proposta baseada na análise de valor e lógica Fuzzy* (Dissertação de mestrado). COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Lima, MC (2003). *Degradação Físico-Química e Mineralógica de maciço junto às voçorocas* (Tese de doutorado). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília.
- Mandala, SD (2016). *Análise da degradação ambiental por erosão hídrica de solos na bacia hidrográfica do Rio Lifidzi no Planalto de Angónia: contribuição metodológica para Moçambique* (Tese de doutorado). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Rio Claro.
- Marín, M. (2005). *Hidrologia Prática* (2ª ed.). Madri: Rugarte.
- Marques, M. M. (1992). Formas de manipulação do solo. In JE Ferrão (Ed.), *Agricultura e Desertificação*. Lisboa: Associação Internacional das Jornadas de Engenharia dos Países de Língua Portuguesa.
- Mathias, DT (2016). *Contribuição metodológica para o diagnóstico da dinâmica erosiva linear e seu prognóstico evolutivo para subsidiar projetos de recuperação* (Tese de doutorado).
- Mathias, DT, Lupinacci, CM, & Nunes, JOR (2020). Identificação dos fluxos de escoamento superficial em área de relevo tecnogênico a partir do uso de modelos hidrológicos em SIG. *Sociedade & Natureza*, 32, 820-831.
- Mazalo, TJCE (2018). *Cartografia de ocupação da terra com imagens Landsat para o distrito de Marracuene - Moçambique* (Dissertação de mestrado). Programa de Pós-Graduação em Ciência e Sistemas de Informação Geográfica.
- Meneses, BMCS (2011). *Erosão Hídrica de Solos: Caso de Estudo do Concelho de Tarouca* (Dissertação de mestrado). Área de Especialização em Detecção Remota e Sistemas de Informação Geográfica, Universidade Nova de Lisboa.
- MICOA. (2007). *Plano de Ação para a Prevenção e Controle de erosão de solos (2008 - 2018)*. Ministério para a Coordenação da Ação Ambiental. Maputo
- Ministério da Economia e Finanças & Ministério da Terra, Ambiente e Desenvolvimento Rural. (2015). *Perfil Ambiental Distrital de Changara: Avaliação Ambiental Estratégica, Plano Multissetorial, Plano Especial de Ordenamento Territorial do Vale do Zambeze e Modelo Digital de Suporte a Decisões*. Agência de Desenvolvimento do Vale do Zambeze.

- Ministério de Administração Estatal (2014). *Perfil Distrital de Changara*. Maputo.
- Morgan, RPC (1996). *Erosão do solo e conservação* (2ª ed.). Inglaterra: Logman.
- Morgan, RPC (2005). *Erosão do solo e conservação do solo* (3ª ed.). Oxford: Blackwell Publishing.
- Morgan, RPC, Quinton, JN, Smith, RE, Govers, G., Poesen, JWA, Auerswald, K., ... & Styczen, ME (1998). O Modelo Europeu de Erosão do Solo (EUROSEM): uma abordagem dinâmica para prever o transporte de sedimentos de campos e pequenas bacias hidrográficas. *Earth Surface Processes and Landforms*, 527-544.
- Neto, JAB, Nascimento, PSR, & Barros, GVP (2022). Análise Hierárquica Aplicada à Erosão do Solo na Bacia Hidrográfica do Rio Sergipe (SE). *Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais*, 10(2), 82-106.
- Ngetar, NS e Phinzi, K. (2019). A avaliação da erosão hídrica no nível da bacia usando RUSLE baseado em GIS e sensoriamento remoto: uma revisão. *Pesquisa Internacional sobre Conservação do Solo e da Água*, 7, 27-46. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2018.12.002>
- Niquisse, S., Luís, AA, & Puna, AA (2017). *Análise e avaliação multitemporal da mudança da cobertura vegetal e uso de solo na bacia hidrográfica do Búzi (1986-2016)*. Beira
- Nkeshimana, G. (2008). *A relação entre práticas de gestão de terras, propriedades físicas do solo e erosão em sistemas de café no sul de Ruanda* (Dissertação de mestrado).
- Nordstrom, K. (1988). *Erosão de ravinas nas terras baixas do Lesoto: Um estudo geomorfológico das interações entre variáveis intrínsecas e extrínsecas* (UNGI Rapport 69). Uppsala
- Phinzi, K. e Ngetar, NS (2019). A avaliação da erosão hídrica no nível da bacia usando RUSLE baseado em GIS e sensoriamento remoto: uma revisão. *Pesquisa Internacional sobre Conservação do Solo e da Água*, 7, 27-46. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2018.12.002>
- Pimentel, D. (2006). Erosão do solo: uma ameaça alimentar e ambiental. *Meio Ambiente, Desenvolvimento e Sustentabilidade*, 8, 119-137.
- Pruski, FF (2013). *Conservação de solo e água: práticas no controle da erosão hídrica* (2ª ed.). Viçosa: UFV.
- Ramidan, MAS (2003). *Estudo de um processo de voçorocamento próximo a UHE de Itumbiara-GO* (Dissertação de mestrado). Rio de Janeiro.
- Saaty, TL (1990). Como tomar uma decisão: O processo de hierarquia analítica. *European Journal of Operational Research*, 48, 9-26.
- Saaty, TL, & Vargas, LG (1991). *Predição, projeção e previsão*. Boston: Kluwer Academic.
- Saco, CNJ (2003). *Variação espacial da erosão actual no município de Nacala* (Dissertação de licenciatura). Universidade Eduardo Mondlane, Maputo.



- Saha, A. (2021). Uma abordagem integrada para identificar áreas adequadas para desenvolvimento construído usando análise multicritério baseada em GIS e AHP na área de planejamento de Siliguri, Índia. *SN Applied Sciences*, 3(395). <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04354-5>
- Samizava, TM (2006). *A SIG aplicou a avaliação de áreas para a instalação de aterro sanitário: estudo de caso no município de Presidente Prudente – SP*.
- Schwab, GO, Frevert, RK, Edminster, TW, & Barnes, KK (1981). *Engenharia de conservação de solo e água* (3ª ed.). Canadá.
- Seutloali, KE e Beckedahl, HR (2015). Uma revisão da erosão do solo relacionada às estradas: uma avaliação das causas, técnicas de avaliação e medidas de controle disponíveis. *Jornal de Pesquisa em Ciências da Terra*, 19, 73-80.
- Strömquist, L. (Ed.). (2020). *Monitorização da perda de solo em diferentes níveis de observação: Estudos de caso de erosão do solo nas Terras Baixas do Lesoto*. Uppsala: Uppsala .
- Szilassi, P., Jordan, G., Van Rompaey, A., & Csillag, G. (2006). Impactos das mudanças históricas no uso da terra na erosão e nas propriedades agrícolas do solo na Bacia de Kali no Lago Balaton, Hungria. *Catena*, 68, 96-108.
- Trindade, PMP, Peixoto, DWB, Silveira, GV, Kuplich, TM, & Narvaes, IS (2023). Mapeamento de cobertura e uso da terra no bioma Pampa utilizando diferentes sensores orbitais e classificador Random Forest. *Revista GEOgrafias*, 19(2).
- TV Miramar. (2023). Mais de 500 famílias vivem na zona de risco no distrito de Changara [Vídeo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=Sgu4hLpqFBY>
- Viana, CS (2000). *Caracterização dos processos erosivos no município de Belo Horizonte: uma contribuição à gestão ambiental e ao planejamento urbano* (Dissertação de mestrado).
- Wambeke, AV (1986). *Mapeamento de riscos de erosão* . Maputo: INIA/DTA.

**Anexo 1:** Matrix de confusão- processo de avaliação da precisão global e Índice Kappa da classificação supervisionada para validação do mapa de Uso e Cobertura da Terra.

|                                      |       |      |      |      |      |      |     |       |      |      |                |                                                |
|--------------------------------------|-------|------|------|------|------|------|-----|-------|------|------|----------------|------------------------------------------------|
|                                      | 1     | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7   | 8     | 9    | 10   | Soma Linha xi+ | Soma(xi+ * x+i)                                |
| Água -1                              | 13428 | 7    | 0    | 10   | 0    | 0    | 8   | 0     | 1    | 12   | 13466          | 181427418                                      |
| Área Habitacional -2                 | 17    | 1186 | 2    | 100  | 15   | 3    | 5   | 0     | 1    | 3    | 1332           | 2029968                                        |
| Cultivado de Sequeiro -3             | 0     | 2    | 1586 | 14   | 0    | 0    | 0   | 0     | 0    | 0    | 1602           | 2592036                                        |
| Solo Sem Vegetação -4                | 10    | 288  | 30   | 6144 | 547  | 58   | 4   | 0     | 221  | 144  | 7446           | 51690132                                       |
| Formação Herbácea -5                 | 0     | 16   | 0    | 243  | 652  | 107  | 0   | 0     | 6    | 3    | 1027           | 1421368                                        |
| Formação Herbácea Arborizada -6      | 0     | 21   | 0    | 102  | 153  | 1779 | 8   | 386   | 32   | 11   | 2492           | 7002520                                        |
| Vegetação regularmente Inundada -7   | 1     | 4    | 0    | 1    | 0    | 10   | 206 | 1     | 0    | 0    | 223            | 51959                                          |
| Floresta aberta de Baixa Altitude -8 | 0     | 0    | 0    | 1    | 4    | 835  | 2   | 28135 | 37   | 85   | 29099          | 830514559                                      |
| Matagal Aberto -9                    | 1     | 0    | 0    | 243  | 8    | 14   | 0   | 8     | 2899 | 748  | 3921           | 14194020                                       |
| Muita Arbustos Baixos -10            | 16    | 0    | 0    | 84   | 5    | 4    | 0   | 11    | 423  | 1478 | 2021           | 5020164                                        |
| Soma Coluna x+1                      | 13473 | 1524 | 1618 | 6942 | 1384 | 2810 | 233 | 28541 | 3620 | 2484 | 57493          | 1095944144                                     |
|                                      |       |      |      |      |      |      |     |       |      |      | 57493          | ←A (Acerto geral) = soma da diagonal principal |

|                                      |       |
|--------------------------------------|-------|
| N (Número total de pontos amostrais) | 62629 |
|--------------------------------------|-------|

|                                 |                          |   |     |
|---------------------------------|--------------------------|---|-----|
| Cálculo da Exatidão Global (EG) | $EG = \frac{A}{N} * 100$ | = | 92% |
|---------------------------------|--------------------------|---|-----|

Onde:  
EG = Exatidão Global;  
A = Acerto geral (pontos amostrais com acertos);  
N = Número de pontos amostrais;

Fonte: Cunha et al. (2022). Calculado pelo Autor

**A exatidão Global da Classificação é de 92 %**

**O índice de concordância Kappa, é de 0,886195 classificado como muito bom**

Cálculo do Índice Kappa (K):

Equação (1):

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^n x_{ii} - \sum_{i=1}^n (x_{i+} * x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^n (x_{i+} * x_{+i})} \quad (1)$$

1 N \* Soma(xii) = 3600729097

2 N² = 3922391641

3 K = ((n² \* Soma(xii) - Soma(xi+ \* x+i)) / (n² - Soma(xi+ \* x+i))) = 2504784953

4 K = ((N² - Soma(xi+ \* x+i)) / (N² - Soma(xi+ \* x+i))) = 2826447497

5 k=K = ((n² \* Soma(xii) - Soma(xi+ \* x+i)) / (n² - Soma(xi+ \* x+i))) = 0,886195

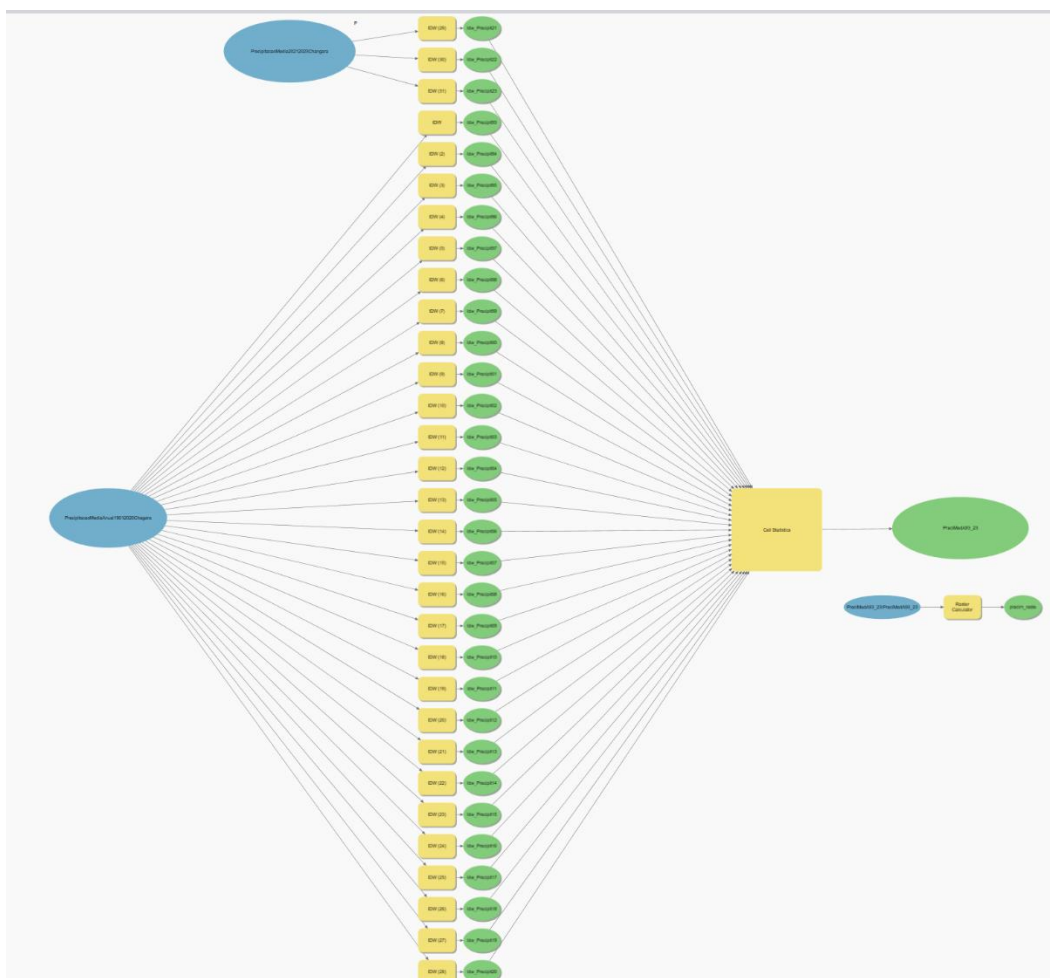
  

Tabela 01. Limites de Índice de Kappa.

| Índice Kappa | Concordância |
|--------------|--------------|
| 0,00         | Péssima      |
| 0,01 a 0,20  | Ruim         |
| 0,21 a 0,40  | Razoável     |
| 0,41 a 0,60  | Bom          |
| 0,61 a 0,80  | Muito Bom    |
| 0,81 a 1,00  | Excedente    |

Fonte: Landis e Koch (1977).

**Anexo 2:** Modelbuild- Processo de interpolação IDW e calculo da Intensidade Pluviométrica da série histórica de 30 anos (1993-2023).



**Anexo 3:** Aspecto da Erosão Laminar, Sulco e Ravinar no Distrito de Changara Posto Administrativo de Luenha-sede.

Erosão Laminar



Erosão em Sulco/Ravinar





**Anexo 4:** Aspecto da Erosão Ravinar no Distrito de Changara Posto Administrativo de Luenha-sede, há menos 5 metros das residências.





## **Anexo 5:** Aspecto da Erosão em Sulco, Ravinar e Fluvial no Distrito de Changara Posto

Administrativo de Luenha-sede.

### Erosão Fluvial

