



**UNIVERSIDAD AGRARIA DEL ECUADOR  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS  
CAMPUS DR. JACOBO BUCARAM ORTIZ  
CARRERA AGRONOMÍA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN COMO REQUISITO PREVIO PARA LA  
OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA AGRÓNOMA**

**MODELIZACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA CON ENFOQUE  
DESDE LA PERSPECTIVA DE LOS SERVICIOS  
ECOSISTÉMICOS EN EL PARQUE NACIONAL EL CAJAS**

**AUTORA**

**AGUILERA CHUYA KARLA NICOLE**

**TUTOR**

**ING. RODRÍGUEZ JARAMA FANNY DEL ROCÍO, MSc.**

**GUAYAQUIL - ECUADOR**

**2025**



**UNIVERSIDAD AGRARIA DEL ECUADOR  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS  
DR. JACOBO BUCARAM ORTIZ  
CARRERA AGRONOMÍA**

**APROBACIÓN DEL TUTOR**

El suscrito, docente de la Universidad Agraria del Ecuador, en mi calidad de Tutor, certifico que el presente trabajo de titulación: **MODELIZACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA CON ENFOQUE DESDE LA PERSPECTIVA DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS EN EL PARQUE NACIONAL EL CAJAS**, realizado por la estudiante **AGUILERA CHUYA KARLA NICOLE**; con cédula de identidad N° 0950363648 de la carrera **AGRONOMÍA**, Unidad Académica **Guayaquil**, ha sido orientado y revisado durante su ejecución; y cumple con los requisitos técnicos y legales exigidos por la Universidad Agraria del Ecuador; por lo tanto, se aprueba la presentación del mismo.

Atentamente,

Ing. Rodríguez Jarama Fanny del Rocío, MSc.

Guayaquil, 26 de febrero del 2025



**UNIVERSIDAD AGRARIA DEL ECUADOR**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**  
**DR. JACOBO BUCARAM ORTIZ**  
**CARRERA AGRONOMÍA**

**APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

Los abajo firmantes, docentes designados por el H. Consejo Directivo como miembros del Tribunal de Sustentación, aprobamos la defensa del trabajo de titulación: **“MODELIZACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA CON ENFOQUE DESDE LA PERSPECTIVA DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS EN EL PARQUE NACIONAL EL CAJAS”** realizado por la estudiante **AGUILERA CHUYA KARLA NICOLE** el mismo que cumple con los requisitos exigidos por la Universidad Agraria del Ecuador.

Atentamente,

---

Ing. Veliz Piguave Freddy, M.Sc.  
**PRESIDENTE**

---

Ing. Vélez Duque Pedro, M.Sc.  
**EXAMINADOR PRINCIPAL**

---

Ing. Amaya Márquez Darlyn, M.Sc.  
**EXAMINADOR PRINCIPAL**

---

Ing. Rodríguez Jarama Fanny Del Rocío, M.Sc.  
**EXAMINADOR SUPLENTE**

Guayaquil, 20 de febrero del 2025

## **DEDICATORIA**

A Dios, por ser mi guía en todo este proceso académico y permitirme culminar con éxito esta hermosa carrera.

A mi abuelos, Rosario y Néstor, por su apoyo, consejos y amor incondicional hasta ahora, por estar y siempre creer en mis capacidades. Sobre todo a ti viejito, que ya no estás en este plano terrenal.

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar, agradezco a Dios, a mis abuelos, a mis padres, y a Mariuxi sin ustedes no hubiera sido posible culminar con éxito mi trabajo de investigación ni mi carrera universitaria.

Agradezco a mi directora de tesis la Ing. Fanny Rodríguez por ser mi guía en este trabajo de investigación, de igual manera, al Dr. Diego Portalanza por su arduo trabajo, gracias a sus conocimientos impartidos sobre las herramientas que se utilizaron en este proyecto.

A mis compañeros de carrera, en especial a mi gran amigo Gabriel por siempre estar allí y creer en mi.

## **Autorización de Auditoría Intelectual**

Yo **AGUILERA CHUYA KARLA NICOLE**, en calidad de autora del proyecto realizado, sobre **“MODELIZACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA CON ENFOQUE DESDE LA PERSPECTIVA DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS EN EL PARQUE NACIONAL EL CAJAS”** para optar el título de INGENIERA AGRÓNOMA, por la presente autorizo a la UNIVERSIDAD AGRARIA DEL ECUADOR, hacer uso de todos los contenidos que me pertenecen o parte de los que contienen esta obra, con fines estrictamente académicos o de investigación. Los derechos que como autora me correspondan, con excepción de la presente autorización, seguirán vigentes a mi favor, de conformidad con lo establecido en los artículos 5, 6, 8; 19 y demás pertinentes de la Ley de Propiedad Intelectual y su Reglamento.

Guayaquil, febrero 26 del 2025

**AGUILERA CHUYA KARLA NICOLE**

**C.I. 0950363648**

## RESUMEN

El trabajo de investigación evaluó la vulnerabilidad del Parque Nacional Cajas frente al impacto de la erosión, para ello, se dio uso del modelo ecosistémico propuesto por Ecoser denominado control de erosión hídrica. La toma de insumos necesarios como imágenes satelitales para la obtención del NDVI, el coeficiente de estabilidad o variación de este índice y la pendiente topográfica estimaron esta función ecosistémica por medio de la ecuación de control de erosión la vulnerabilidad de este ecosistema frente a la erosión. Por medio de los Sistemas de Información Geográfica se mapearon los procesos respectivos para determinar si existe o no vulnerabilidad de este ecosistema ante la erosión. Los resultados evidenciaron que, en efecto, el Cajas enfrenta una alta vulnerabilidad a este fenómeno con un control bajo de erosión en el 99.57% (28421.4 hectáreas) de su área total para el año 2023, situación que se mantuvo en esta categoría en 2024 con el 79.18% o en las 22597.74 hectáreas cuyas pendientes abruptas y los suelos descubiertos contribuyen a la inestabilidad y el aumento de erosión. Este evento amenaza la biodiversidad y los servicios ecosistémicos que ofrece el parque, por ello, para mitigar el impacto erosivo se propusieron medidas de gestión ambiental como la restauración, reforestación, conservación, monitoreo, regulación del turismo y educación ambiental.

**Palabras clave:** *Coeficiente de estabilidad, ecoser, erosión hídrica, imágenes satelitales, NDVI, sistemas de información geográfica.*

## ABSTRACT

The research evaluated the vulnerability of Cajas National Park to the impact of erosion. To do so, the control of water erosion was evaluated using the ecosystemic model proposed by Ecoser. Taking necessary inputs such as satellite images to obtain the NDVI, the coefficient of stability or variation of this index and the topographic slope, this ecosystemic function was estimated by means of the erosion control equation. Using Geographic Information Systems, the respective processes were mapped to determine whether or not this ecosystem is vulnerable to erosion. The results showed that the Caja faces a high vulnerability to this phenomenon with low erosion control in 99.57% (28,421.4 hectares) of its total area for the year 2023, a situation that remained in this category in 2024 with 79.18% or 22,597.74 hectares whose steep slopes and uncovered soils contribute to instability and increased erosion. This event threatens the biodiversity and ecosystem services offered by the park, therefore, to mitigate the impacts, environmental management measures such as reforestation, conservation, monitoring, regulation of tourism and environmental education were proposed.

**Keywords:** *Ecoser, geographic information systems, NDVI, satellite images, stability coefficient, water erosion*



## ÍNDICE GENERAL

|                                                             |             |
|-------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>PORTADA.....</b>                                         | <b>i</b>    |
| <b>APROBACIÓN DEL TUTOR .....</b>                           | <b>ii</b>   |
| <b>APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN.....</b>         | <b>iii</b>  |
| <b>DEDICATORIA.....</b>                                     | <b>iv</b>   |
| <b>AGRADECIMIENTO .....</b>                                 | <b>v</b>    |
| <b>Autorización de Auditoría Intelectual .....</b>          | <b>vi</b>   |
| <b>RESUMEN .....</b>                                        | <b>vii</b>  |
| <b>ABSTRACT.....</b>                                        | <b>viii</b> |
| <b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>                               | <b>xii</b>  |
| <b>ÍNDICE DE ANEXOS .....</b>                               | <b>xiii</b> |
| <b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>                                | <b>1</b>    |
| <b>1.1 Antecedentes del problema .....</b>                  | <b>1</b>    |
| <b>1.2 Planteamiento y formulación del problema.....</b>    | <b>2</b>    |
| <b>1.2.1 Planteamiento del problema.....</b>                | <b>2</b>    |
| <b>1.2.2 Formulación del problema .....</b>                 | <b>3</b>    |
| <b>1.3 Justificación de la investigación .....</b>          | <b>3</b>    |
| <b>1.4 Delimitación de la investigación.....</b>            | <b>3</b>    |
| <b>1.5 Objetivo general.....</b>                            | <b>4</b>    |
| <b>1.6 Objetivos específicos .....</b>                      | <b>4</b>    |
| <b>1.7 Hipótesis o idea a defender .....</b>                | <b>4</b>    |
| <b>2. MARCO TEÓRICO .....</b>                               | <b>5</b>    |
| <b>2.1 Estado del arte .....</b>                            | <b>5</b>    |
| <b>2.2 Bases científicas y teóricas de la temática.....</b> | <b>8</b>    |
| <b>2.2.1 Cuenca hidrográfica.....</b>                       | <b>8</b>    |
| <b>2.2.2 Sistema cuenca hidrográfica .....</b>              | <b>9</b>    |
| <b>2.2.3 Parque Nacional Cajas .....</b>                    | <b>9</b>    |
| <b>2.2.4 El suelo .....</b>                                 | <b>9</b>    |
| <b>2.2.5 Desgaste de los suelos .....</b>                   | <b>9</b>    |
| <b>2.2.6 Erosión hídrica.....</b>                           | <b>10</b>   |
| <b>2.2.7 Servicios ecosistémicos .....</b>                  | <b>10</b>   |
| <b>2.2.7.1. Servicios de aprovisionamiento .....</b>        | <b>10</b>   |
| <b>2.2.7.2. Servicios de regulación.....</b>                | <b>10</b>   |
| <b>2.2.7.3. Servicios culturales .....</b>                  | <b>11</b>   |

|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.2.7.4. Servicios de soporte o apoyo .....                                   | 11 |
| 2.2.8 Ecoser .....                                                            | 11 |
| 2.2.9 Sistemas de información geográfica.....                                 | 11 |
| 2.2.10 Modelo vectorial.....                                                  | 11 |
| 2.2.11 Modelo ráster.....                                                     | 12 |
| 2.2.12 Modelo de elevación digital (DEM).....                                 | 12 |
| 2.2.13 LandSat9.....                                                          | 12 |
| 2.2.14 Landsat 8.....                                                         | 13 |
| 2.2.15 Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).....             | 13 |
| 2.2.16 Pendiente.....                                                         | 13 |
| 2.3 Marco legal .....                                                         | 14 |
| 2.3.1 Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua..... | 14 |
| 2.3.2 Código Orgánico del Ambiente .....                                      | 14 |
| 3. MATERIALES Y MÉTODOS.....                                                  | 16 |
| 3.1 Enfoque de la investigación.....                                          | 16 |
| 3.1.1 Tipo y alcance de la investigación .....                                | 16 |
| 3.1.1.1. Investigación documental .....                                       | 16 |
| 3.1.2 Diseño de investigación.....                                            | 16 |
| 3.2 Metodología.....                                                          | 16 |
| 3.2.1 Variables a medir .....                                                 | 16 |
| 3.2.1.1. Variable independiente .....                                         | 16 |
| 3.2.1.2. Variable dependiente .....                                           | 16 |
| 3.2.1.2.1. Control de erosión.....                                            | 16 |
| 3.2.1.2.2. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).....         | 17 |
| 3.2.1.2.3. Coeficiente de estabilidad ( $CV(NDVI)$ ).....                     | 17 |
| 3.2.1.3. Matriz de operacionalización de variables.....                       | 17 |
| 3.2.2 Recolección de datos .....                                              | 18 |
| 3.2.3 Recursos .....                                                          | 18 |
| 3.2.3.1. Recursos bibliográficos .....                                        | 18 |
| 3.2.3.2. Recursos económicos.....                                             | 18 |
| 3.2.3.3. Recursos humanos.....                                                | 19 |
| 3.2.3.4. Métodos y técnicas .....                                             | 19 |
| 3.2.3.4.1. Métodos de investigación.....                                      | 19 |

|                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.2.3.4.2. Técnicas de investigación.....                                                                                        | 19 |
| 3.2.4 Análisis estadístico .....                                                                                                 | 25 |
| 4. RESULTADOS .....                                                                                                              | 26 |
| 4.1 Análisis de datos digitales utilizando plataformas satelitales para el modelo ecosistémico en el Parque Nacional Cajas ..... | 26 |
| 4.1.1 Obtención de datos de las imágenes satelitales Landsat 8 con NDVI correspondiente al año 2023 .....                        | 26 |
| 4.1.2 Obtención de datos de las imágenes satelitales Landsat 9 correspondiente al año 2024 .....                                 | 27 |
| 4.1.3 Información de cobertura y uso de suelo .....                                                                              | 28 |
| 4.1.4 Modelo digital de elevación (DEM).....                                                                                     | 29 |
| 4.1.5 Descripción de la reflectancia del NDVI del año 2023 .....                                                                 | 31 |
| 4.1.6 Descripción de la reflectancia del NDVI del año 2024 .....                                                                 | 31 |
| 4.1.7 Obtención de la pendiente topográfica.....                                                                                 | 32 |
| 4.2 Uso del modelo Ecoser control de erosión hídrica en el Parque Nacional Cajas.....                                            | 34 |
| 4.2.1 Evaluación del control de erosión hídrica del año 2023 .....                                                               | 34 |
| 4.2.2 Evaluación del control de erosión hídrica del año 2024 .....                                                               | 36 |
| 4.2.3 Comparación del control de erosión hídrica del año 2023 y 2024 en el Parque Nacional Cajas.....                            | 37 |
| 4.3 Plan de gestión del suelo de las áreas vulnerables para mitigar su degradación .....                                         | 38 |
| 4.3.1 Diagnóstico de los recursos del Parque Nacional Cajas .....                                                                | 38 |
| 4.3.2 Análisis del estado del Parque Nacional Cajas.....                                                                         | 40 |
| 4.3.3 Problemática dentro del área de investigación.....                                                                         | 40 |
| 4.3.4 Planificación.....                                                                                                         | 41 |
| 5. DISCUSIÓN.....                                                                                                                | 42 |
| 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....                                                                                          | 45 |
| 6.1 Conclusiones.....                                                                                                            | 45 |
| 6.2 Recomendaciones.....                                                                                                         | 46 |
| BIBLIOGRAFÍA .....                                                                                                               | 47 |
| ANEXOS .....                                                                                                                     | 52 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Matriz de operacionalización de la variable independiente.....                                                 | 17 |
| Tabla 2. Matriz de operacionalización de la variable dependiente.....                                                   | 17 |
| Tabla 3. Presupuesto de recursos materiales del proyecto. ....                                                          | 18 |
| Tabla 4. Coordenadas UTM del Parque Nacional Cajas. ....                                                                | 19 |
| Tabla 5. Bandas de las imágenes satelitales Landsat 8. ....                                                             | 21 |
| Tabla 6. Bandas de las imágenes satelitales Landsat 9. ....                                                             | 22 |
| Tabla 7. Clasificación adaptada del índice de control de erosión hídrica (EC). ....                                     | 24 |
| Tabla 8. Clases y rangos de pendientes.....                                                                             | 25 |
| Tabla 9. Descripción general de los rásteres NDVI mensuales del año 2023 para cálculo del control de erosión (EC).....  | 26 |
| Tabla 10. Descripción general de los rásteres NDVI mensuales del año 2024 para cálculo del control de erosión (EC)..... | 27 |
| Tabla 11. Tipos de coberturas en Parque Nacional Cajas. ....                                                            | 29 |
| Tabla 12. Estadística descriptiva del modelo digital de elevación (DEM). ....                                           | 30 |
| Tabla 13. Estadística descriptiva de la media del NDVI del año 2023. ....                                               | 31 |
| Tabla 14. Estadística descriptiva del NDVI del año 2024. ....                                                           | 32 |
| Tabla 15. Clasificación y rango de valores de la pendiente topográfica. ....                                            | 34 |
| Tabla 16. Clasificación y rango de valores del control de erosión hídrica año 2023.....                                 | 35 |
| Tabla 17. Clasificación y rango de valores del control de erosión hídrica año 2024.....                                 | 37 |
| Tabla 18. Elementos biofísicos dentro del Parque Nacional Cajas.....                                                    | 39 |
| Tabla 19. Elementos socio – económicos en el Parque Nacional Cajas. ....                                                | 40 |
| Tabla 20. Programa de mejoras para la conservación del parque.....                                                      | 41 |
| Tabla 21. Catálogo de clases de cobertura del área de estudio 2023 – 2024. ....                                         | 79 |

## ÍNDICE DE ANEXOS

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Mapa de cobertura y uso del suelo del Parque Nacional Cajas. ....                                     | 28 |
| Figura 2. Mapa del modelo de elevación digital (DEM) del Parque Nacional Cajas.....                             | 30 |
| Figura 3. Mapa de pendiente expresada en porcentaje del Parque Nacional Cajas.....                              | 33 |
| Figura 4. Mapa de la función ecosistémica control de erosión hídrica año 2023 en el Parque Nacional Cajas. .... | 34 |
| Figura 5. Mapa de la función ecosistémica control de erosión hídrica año 2024 en el Parque Nacional Cajas. .... | 36 |
| Figura 6. Delimitación del Parque Nacional Cajas. ....                                                          | 52 |
| Figura 7. Clasificación de la cobertura y uso del suelo (LULC) del Parque Nacional Cajas. ....                  | 53 |
| Figura 8. Mapa de NDVI en el mes de enero 2023. ....                                                            | 53 |
| Figura 9. Mapa de NDVI en el mes de febrero 2023. ....                                                          | 54 |
| Figura 10. Mapa de NDVI en el mes de marzo 2023. ....                                                           | 56 |
| Figura 11. Mapa de NDVI en el mes de mayo 2023.....                                                             | 57 |
| Figura 12. Mapa de NDVI en el mes de junio 2023.....                                                            | 58 |
| Figura 13. Mapa de NDVI en el mes de julio 2023.....                                                            | 59 |
| Figura 14. Mapa de NDVI en el mes de agosto 2023.....                                                           | 60 |
| Figura 15. Mapa de NDVI en el mes de septiembre 2023.....                                                       | 60 |
| Figura 16. Mapa de NDVI en el mes de octubre 2023. ....                                                         | 62 |
| Figura 17. Mapa de NDVI en el mes de noviembre 2023.....                                                        | 63 |
| Figura 18. Mapa de NDVI en el mes de diciembre 2023.....                                                        | 64 |
| Figura 19. Mapa de NDVI en el mes de enero 2024. ....                                                           | 65 |
| Figura 20. Mapa de NDVI en el mes de febrero 2024. ....                                                         | 66 |
| Figura 21. Mapa de NDVI en el mes de marzo 2024. ....                                                           | 67 |
| Figura 22. Mapa de NDVI en el mes de abril 2024.....                                                            | 68 |
| Figura 23. Mapa de NDVI en el mes de mayo 2024.....                                                             | 69 |
| Figura 24. Mapa de NDVI en el mes de julio 2024.....                                                            | 70 |
| Figura 25. Mapa de NDVI en el mes de agosto 2024.....                                                           | 71 |
| Figura 26. Mapa de NDVI en el mes de septiembre 2024.....                                                       | 72 |
| Figura 27. Mapa de NDVI en el mes de octubre 2024. ....                                                         | 73 |
| Figura 28. Mapa de NDVI en el mes de noviembre 2024.....                                                        | 74 |

|                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 29. Mapa de NDVI en el mes de diciembre 2024.....                                    | 75 |
| Figura 30. Visita al Parque Nacional Cajas con la directora de tesis. ....                  | 76 |
| Figura 31. Flora nativa del Parque Nacional Cajas. ....                                     | 76 |
| Figura 32. Vegetación del Parque Nacional Cajas. ....                                       | 77 |
| Figura 33. Evidencia de pastizales en el Parque Nacional Cajas.....                         | 77 |
| Figura 34. Actividad turística como senderismo en Tres Cruces - Parque Nacional Cajas. .... | 78 |

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes del problema

Los servicios ecosistémicos (SE) se pueden conceptualizar como las condiciones, procesos y elementos del entorno natural que aportan beneficios tanto tangibles como intangibles, esenciales para el sostenimiento de la vida humana. Esto incluye, la provisión de recursos naturales, la regulación de procesos ecológicos, el mantenimiento de la biodiversidad, y el ofrecimiento de oportunidades recreativas y culturales. Al considerar estos servicios, se reconoce la interdependencia entre los sistemas naturales y las actividades humanas, marcan la importancia de conservar y gestionar de manera adecuada los ecosistemas para asegurar la continuidad y calidad de los beneficios que proporcionan a la humanidad (Portalanza et al., 2019).

La erosión hídrica se caracteriza como un fenómeno natural y progresivo que puede ocurrir de manera casi imperceptible influenciado por factores como el clima, la vegetación, las características del suelo y la topografía. Según un informe de la FAO del año 2016, existen tres amenazas cruciales para los suelos en América Latina y el Caribe, entre ellos están la erosión, la pérdida de carbono orgánico y la salinización. Estas amenazas reflejan cómo las prácticas agrícolas modernas deterioran los recursos naturales mismas que arriesgan los servicios ecosistémicos. La transformación del uso de la tierra y la adopción de tecnologías en el último siglo han impactado de manera significativa la estructura y funcionalidad de los ecosistemas Somoza y Vázquez (2023). No solo impacta las características físicas de un área, sino que también altera su capacidad de sostener vida vegetal, su productividad, y la disponibilidad de otros recursos naturales. Además, la velocidad a la que ocurre la erosión está determinada por una variedad de factores como la forma del área, las propiedades del suelo, el régimen de agua, la cobertura vegetal, la gestión del suelo, entre otros aspectos (Alvarado, 2021).

El Parque Nacional Cajas (PNC) ubicado al occidente de Cuenca en la provincia de Azuay, abarca 28544 hectáreas con altitudes entre los 3150 y 4450 msnm. Se accede por la carretera Cuenca – Molleturo – Naranjal al norte, y al sur por Cuenca – Soldados – Angas. Presenta diversos tipos de vegetación, desde el bosque húmedo montano hasta el páramo, que es su ecosistema predominante. Los páramos son cruciales para el control hídrico, absorbiendo agua de lluvia y

liberándola de forma lenta, con beneficio a miles de personas para consumo y riego (Ulloa et al., 2017).

## **1.2 Planteamiento y formulación del problema**

### **1.2.1 Planteamiento del problema**

El Parque Nacional Cajas, situado en la cordillera de los Andes, es un ecosistema único y de gran importancia ecológica debido a su diversidad de cuerpos de agua y su vital función en la regulación del ciclo hidrológico de la región. Sin embargo, este entorno enfrenta desafíos significativos asociados a la erosión hídrica, un fenómeno que puede tener impactos adversos en la calidad del agua, biodiversidad y los servicios ecosistémicos que proporciona el parque.

En los ecosistemas de páramo, se encuentran servicios ecosistémicos de gran importancia en términos biológicos, hidrológicos, sociales, culturales y económicos. La presencia de vegetación natural contribuye de manera significativa al aumento de carbono en el suelo al proporcionar gran cantidad de materia orgánica. Esta vegetación también actúa como protectora al aislar el suelo de la fuerza de la precipitación, reducen la escorrentía y evitan el rompimiento de los agregados superficiales en fragmentos de tamaño transportable (Pinos et al., 2021).

A pesar de la relevancia de abordar la erosión hídrica en esta área, la falta de un enfoque integral desde la perspectiva de los servicios ecosistémicos limita la comprensión y la capacidad de gestionar de forma eficaz esta problemática. El modelado de este fenómeno con un enfoque centrado en los servicios ecosistémicos se vuelve crucial para identificar la alta o baja vulnerabilidad presenta este ecosistema, además de evaluar cómo afecta la capacidad del parque para brindar SE valiosos como la regulación del agua, conservación de la biodiversidad y la recreación.

El estudio de la erosión hídrica en el PNC desde la perspectiva de los servicios ecosistémicos no solo contribuye a mejorar la comprensión de los procesos naturales que ocurren en este ecosistema, sino que también proporciona información valiosa para el diseño de estrategias de manejo y conservación efectivas que aseguran la sostenibilidad de este importante patrimonio natural.

Por medio del modelo de estimación relativa de los servicios ecosistémicos propuesto por el protocolo Ecoser según Barral (2017), se estima la vulnerabilidad de este ecosistema ante la erosión hídrica existente dando uso de “Sistemas de



Información Geográfica (SIG)” y el mapeo de esta función para que refleje si existe un alto o bajo control de erosión (EC).

### **1.2.2 Formulación del problema**

¿Con el modelo propuesto por Ecoser enfocado en los servicios ecosistémicos se evidenciará la vulnerabilidad del ecosistema en el Parque Nacional Cajas a la erosión hídrica?

### **1.3 Justificación de la investigación**

En este trabajo investigativo se propone evaluar la vulnerabilidad ante la erosividad que presenta el Parque Nacional Cajas a través de un modelo de estimación relativa de los servicios ecosistémicos, esto se debe a que el parque enfrenta desafíos significativos relacionados con la erosión por estar situado en la cordillera occidental de los Andes, misma que presenta elevaciones y pendientes pronunciadas, lo cual puede tener impactos negativos como riesgo hidro – geológico, daños significativos de la biodiversidad y la degradación de las funciones y servicios que proporciona este ecosistema.

Por medio del modelo propuesto por Ecoser, con el servicio ecosistémico de regulación denominado control de erosión, además del coeficiente de estabilidad y la pendiente topográfica, se determina la vulnerabilidad que posee este ecosistema a la erosión del suelo, proponiendo este indicador como recurso para el mapeo de la función del entorno natural, de este modo, lograr un análisis real de los elementos mencionados y así contemplar de manera geográfica por medio de los SIGs el alto o bajo control de erosión existente en el parque.

Con el uso de SIGs, herramientas y plataformas integradas al monitoreo y mapeo se obtuvo un análisis cabal. Por tanto, es primordial proponer medidas de conservación como un plan de manejo de suelo de las áreas vulnerables, proponer mejoras o diseñar estrategias de manejo y conservación más efectivas para preservar la salud del suelo.

Esta investigación contribuirá al conocimiento científico en el campo de la conservación ambiental y la gestión de áreas protegidas, con el objetivo de asegurar la sostenibilidad y el adecuado funcionamiento de este entorno.

### **1.4 Delimitación de la investigación**

- **Espacio:** El presente trabajo de investigación se realizó en el Parque Nacional Cajas mismo que pertenece al cantón Cuenca en la provincia del Azuay con una extensión de 285.4 km<sup>2</sup>.

- **Tiempo:** El trabajo de investigación se realizó desde agosto 2024 hasta enero 2025.
- **Población:** La investigación estuvo orientada a compensar información a investigadores interesados en el tema y a la ciudadanía del cantón Cuenca.

### **1.5 Objetivo general**

Evaluar el control de erosión hídrica presente en el Parque Nacional Cajas con un modelo de estimación relativa de los servicios ecosistémicos

### **1.6 Objetivos específicos**

- Ejecutar el levantamiento de información requerida para el modelo ecosistémico en el Parque Nacional Cajas.
- Estimar el nivel de control de erosión existente en el Parque Nacional Cajas por medio de Sistemas de Información Geográfica.
- Proponer un plan de gestión del suelo de las áreas vulnerables para mitigar su degradación.

### **1.7 Hipótesis o idea a defender**

El Parque Nacional Cajas entrega un servicio total de control de erosión, por ello se usarán las imágenes satelitales disponibles de los años 2023 y 2024 para conocer si este ecosistema es vulnerable frente a la erosión hídrica.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Estado del arte

La erosión hídrica comienza con la desagregación de partículas debido a la acción del agua y culmina con el depósito de materiales transportados por la corriente en áreas de sedimentación. El desprendimiento de una partícula ocurre cuando las fuerzas ejercidas por el flujo superan las fuerzas que mantienen la partícula unida a la masa del suelo, es decir, se excede un esfuerzo crítico de corte. En otras palabras, la fuerza por unidad de área necesario para vencer la resistencia de los agregados es mayor. Como resultado, la desagregación inicial ocurre por efecto de la salpicadura, creando un sello superficial en el suelo que reduce de forma drástica su capacidad de infiltración (Cuevas, 2021).

Álvarez (2019) señala en su estudio que las imágenes satelitales han transformado de forma significativa la cartografía de los suelos mediante la incorporación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Esta herramienta ha permitido integrar y superponer capas temáticas, lo que facilita la identificación precisa de los suelos en áreas específicas. De igual manera, permite analizar los fenómenos que los impactan, como es el caso de la erosión, lo cual genera resultados que contribuyen al monitoreo ambiental, a una gestión más eficiente de los recursos naturales, y fortalece la capacidad de respuesta frente a desastres naturales o provocadas por actividades humanas.

En un estudio realizado por Zumaeta (2021) comenta acerca de un análisis multitemporal y predictivo sobre el cambio en el uso del suelo y la pérdida de cobertura vegetal, donde se empleó técnicas de teledetección mediante análisis geoespacial aplicadas a imágenes satelitales Landsat. El estudio reveló que la cobertura boscosa (BO) sufrió una reducción de 592.40 has durante el periodo de 20 años (1998 – 2018). Asimismo, la simulación proyectada hacia el año 2030 indicó una pérdida adicional de 129.40 has, con una concentración muy alta del 0.53%. Se concluyó que la degradación antrópica, influenciada en especial por las actividades ganaderas y agrícolas, fue el factor principal en el cambio de uso del suelo y la pérdida de cobertura vegetal, que resultaron en un aumento significativo de áreas dedicadas a pastos y cultivos a lo largo del tiempo.

El crecimiento acelerado de la agricultura en la Argentina desde la década de 1950 tuvo consecuencias ecológicas no previstas. Para comprender estas repercusiones, se diseñó un modelo biofísico para estimar la oferta de servicios

ecosistémicos y el valor económico de la producción agrícola. Se examinan cambios en el uso del suelo a través de datos de censos agrícolas en tres períodos históricos, utilizando información sobre biomasa, cobertura de agua, pendiente, infiltración del suelo, temperatura, precipitación y altitud para evaluar el valor ecológico de las distintas regiones del país. También se compararon los márgenes brutos anuales por hectárea de actividades agrícolas entre diferentes períodos, donde señalan las variaciones regionales en términos económicos y ecológicos debido a la influencia humana. Estos resultados subrayan la importancia de equilibrar consideraciones económicas y ecológicas a nivel regional al elaborar políticas de gestión del territorio (Carreño et al., 2012).

Vanacker et al. (2020) indican que las áreas montañosas tropicales son susceptibles a elevadas tasas de erosión, sobre todo atribuibles a fuertes precipitaciones y topografía empinada y erosionada. Los deslizamientos de tierra son comunes y representan el proceso erosivo predominante, siendo la principal fuente de sedimentos.

El estudio realizado por Vanacker et al. (2022) analizan la efectividad de la infraestructura natural para mitigar la erosión en los Andes, basándose en una revisión sistemática de 118 estudios de caso. Se exploró indicadores de erosión, impacto de infraestructura natural en la mitigación de la erosión, y la necesidad de investigación adicional. Se identificaron tres categorías principales de infraestructura natural: protección y restauración de vegetación natural, forestación, y medidas de conservación suelo – agua. Los indicadores más relevantes fueron el carbono orgánico del suelo y las tasas de pérdida de suelo. Se encontró que la protección de la vegetación natural tiene el mayor impacto en la calidad del suelo, mientras que las medidas de conservación reducen la erosión en un 62.1%. Se destacó la importancia de investigaciones futuras para evaluar la efectividad durante eventos extremos como El Niño – Oscilación del Sur.

El estudio enfocado en el Mapeo y Evaluación de los Ecosistemas y sus Servicios (MAES) en la Unión Europea realizada por Rendon et al. (2022) abordó la influencia negativa de la agricultura en el medio ambiente en esta zona, donde la erosión del suelo se consideró un factor clave en la degradación de los agroecosistemas. Propuso el uso del marco MAES para evaluar la condición del ecosistema y su relación con los servicios que proporciona, enfocado en el control de la erosión a nivel europeo. Los resultados mostraron una alta capacidad de los

agroecosistemas para mitigar la erosión, siendo influida por diversos indicadores ambientales y de gestión. Se enfatiza la importancia de prácticas de manejo conservacionista adaptadas al contexto local y regional para preservar la calidad del suelo y mejorar la salud de los agroecosistemas.

Vatandaşlar y Yavuz (2023), su estudio se enfocó en crear modelos e indicadores para evaluar el control de la erosión en un paisaje semiárido. Se recolectó datos de campo y superficial del suelo en 107 parcelas, lo que señala indicadores como NDVI, factor de manejo de cobertura (C) de la RUSLE, materia orgánica del suelo, relación de cobertura del dosel y tipos de uso/cobertura del suelo (LULC) para medir el rendimiento de servicios ecosistémicos de control de erosión. Se desarrolló dos modelos de regresión donde se dio uso de estos indicadores y se comparó con los resultados de RUSLE. El primer modelo estimó la protección del suelo mediante NDVI ( $R^2_{adj} = 0.90$ ,  $p < 0.05$ ), mientras que el segundo estimó la pérdida anual de suelo con el uso de NDVI y pendiente del terreno ( $R^2_{adj} = 0.57$ ,  $p < 0.05$ ). La investigación presentó un método práctico dentro del marco de indicadores de servicios ecosistémicos para evaluar pronto la erosión del suelo sin necesidad de utilizar RUSLE. Este enfoque proporciona una evaluación práctica y económica de la erosión del suelo, misma que beneficia la toma de decisiones informadas y la mejora en la provisión de servicios ecosistémicos de manera más rentable.

Un estudio se realizó en un municipio sostenible a la desertificación en el Norte AST de Brasil evaluado por Lucena et al. (2023) mencionan que esta investigación se basó en indentificar los servicios ecosistémicos de regulación y control de la erosión en el municipio de Ouro Branco – RN, utilizando análisis de pérdidas y SIG con USLE. Se realizó mapeos de cobertura vegetal y se identificó la presencia de cuerpos de agua, centrándose en los servicios de regulación y mantenimiento cruciales para los ecosistemas. Se concluyó que las áreas más afectadas por la pérdida de suelo son aquellas degradadas, elevadas e inclinadas, lo que resalta la importancia de políticas públicas para la recuperación y preservación de estos entornos, y para identificar áreas prioritarias en la aplicación de la legislación ambiental.

Se realizó un estudio en la provincia de Los Ríos, el Sistema de Humedales Abras de Mantequilla (ADMW) propuesto por Portalanza et al. (2024) donde aluden que este sistema proporciona una variedad de SE, que incluyen la regulación de

inundaciones, el control de la erosión, la retención de nutrientes y la provisión de hábitats. Utiliza una combinación del protocolo Ecoser y una matriz multinivel basada en el método Delphi. La integración de estas metodologías proporciona una oportunidad única para una evaluación integral de los diversos servicios ecosistémicos que ofrecen los humedales. Estos servicios son fundamentales para apoyar prácticas de gestión sostenible, sobre todo en relación con la producción de cultivos. Los resultados revelaron que ADMW tiene el potencial de almacenar una cantidad significativa de carbono orgánico, retener nutrientes y controlar la erosión, siendo estos factores influenciados por la topografía, la presencia de cuerpos de agua y la vegetación. Esta situación subraya la importancia de una gestión integrada que involucre a múltiples partes interesadas para salvaguardar su capacidad de proporcionar servicios ecosistémicos y prevenir daños como la contaminación y la degradación de la cobertura vegetal debido al desarrollo de infraestructuras.

Riscal (2021) indica que los ecosistemas controlan la erosión al prevenir la pérdida de suelo a través de la cobertura vegetal y procesos erosivos. Factores como la pendiente, el NDVI (mayor en los valles por cultivos) y el coeficiente de estabilidad determinan esta función ecosistémica. Un histograma de frecuencia clasifica los valores en bajos, medios y altos, mismos que están asociados con mayor eficacia. En los valles de la región La Aucaranía se concentra el control de erosión debido a pendientes suaves y alta vegetación, mientras que en la Cordillera de los Andes y Nahuelbuta es menor por pendientes pronunciadas y menor cobertura vegetal.

## **2.2 Bases científicas y teóricas de la temática**

### **2.2.1 Cuenca hidrográfica**

Como alude Moreira et al. (2020) una cuenca hidrográfica es una unidad fundamental para el análisis ambiental, debido a que facilita el conocimiento y la evaluación de sus diversos elementos, así como las etapas e intercambios que ocurren dentro de la misma. La adopción de la cuenca hidrográfica como unidad esencial en estos estudios implica una visión sistémica e integrada del medio ambiente. Se considera como un sistema geográfico o un geosistema natural, compuesto por las dinámicas interacciones entre la sociedad y la naturaleza dentro del espacio geográfico que ocupa (Arias et al., 2023).

### **2.2.2 Sistema cuenca hidrográfica**

Una cuenca hidrográfica es un sistema comprendido por tres submódulos: físico, biológico y humano. Todos estos conformados por varios elementos, en donde se determina que el submódulo físico hace mención al grupo de recursos abióticos, el submódulo biológico refiere a los recursos bióticos mientras que el submódulo humano es el grupo de recursos políticos, administrativos y legales (Arias et al., 2023).

### **2.2.3 Parque Nacional Cajas**

El Parque Nacional Cajas, situado alrededor de 35 km al oeste de la ciudad de Cuenca, en la provincia del Azuay, se extiende a altitudes que varían entre los 3160 y los 4450 msnm. Este parque es un sistema montañoso que destaca por su notable biodiversidad, albergando 157 especies de aves. Además, El PNC representa una muestra significativa de los ecosistemas altoandinos, lo que lo convierte en un destino de gran interés tanto para aficionados a la naturaleza como para investigadores científicos. Su diversidad biológica y la variedad de altitudes proporcionan un rico entorno para el estudio y la observación de la flora y fauna características de la región andina (Iñiguez y Aguilar, 2022).

### **2.2.4 El suelo**

Pachés (2020) menciona que el suelo representa un sistema natural de gran complejidad y apertura que forma la capa superior de la corteza terrestre, situado entre la roca madre y la superficie terrestre. Este sistema consta de tres fases: sólida, líquida y gaseosa. La fase sólida engloba diversos elementos como partículas minerales, como los silicatos arcillosos, y componentes orgánicos, incluyendo organismos vivos y compuestos húmicos. La fase líquida está compuesta por el agua y todas las sustancias, orgánicas e inorgánicas, que se encuentran disueltas o en suspensión en ella. Por último, la fase gaseosa corresponde a la atmósfera del suelo que ocupa los espacios porosos entre las partículas sólidas.

### **2.2.5 Desgaste de los suelos**

El desgaste o degradación del suelo es un proceso que causa un impacto negativo en las condiciones biofísicas internas del suelo, afectando su capacidad para sustentar la vida dentro de un ecosistema. Esto abarca funciones como la absorción, el almacenamiento, el reciclaje del agua, la materia orgánica y los nutrientes. La pérdida de cualidades significativas del suelo debido a una mala

gestión lleva a una disminución en su calidad, la cual se define como su capacidad para mantener la productividad biológica, preservar la calidad ambiental y fomentar la salud de la fauna y flora (Acevedo et al., 2020).

### **2.2.6 Erosión hídrica**

Se entiende por erosión hídrica al fenómeno natural que impacta los entornos agrícolas y geográficos al provocar la separación y transporte de partículas del suelo mediante fuerzas erosivas. Se caracteriza por el desplazamiento rápido de la capa superficial del suelo, lo cual puede tener efectos negativos en su fertilidad, facilitar el transporte de nutrientes y contribuir al desarrollo de cuerpos de agua contaminados por nutrientes, microorganismos y sustancias tóxicas, como los metales pesados (Muñoz et al., 2022).

### **2.2.7 Servicios ecosistémicos**

Mugmal et al. (2023) definen a los servicios ecosistémicos como los beneficios que la humanidad obtiene de forma directa e indirecta de la biodiversidad. Estos servicios se dividen en cuatro categorías: servicios de aprovisionamiento, servicios de regulación, servicios culturales y servicios de soporte o apoyo.

#### **2.2.7.1. Servicios de aprovisionamiento.**

Los servicios de aprovisionamiento se refieren a los productos obtenidos del ecosistema, es decir, bienes o materiales tangibles como productos forestales, materias primas, suministro de agua, entre otros que proporcionan beneficios directos a las personas. Estos servicios constituyen el sustento básico para la vida humana, y, a menudo, posee un valor monetario (Villareyna et al., 2020).

#### **2.2.7.2. Servicios de regulación.**

Los servicios de regulación son los beneficios obtenidos a partir de las funciones de los ecosistemas, aunque difíciles de cuantificar de manera económica, son de vital importancia. Entre estos beneficios se incluyen la purificación del aire, la regulación del clima y del ciclo hidrológico, la depuración del agua, y el control de la erosión y la desertificación. Además, los ecosistemas contribuyen al control biológico, la fertilidad del suelo, la polinización, el mantenimiento de hábitats para especies singulares y la protección frente a desastres naturales como deslizamientos de tierra y tormentas costeras (Mugmal et al., 2023).



### **2.2.7.3. Servicios culturales.**

Los servicios ecosistémicos culturales se vinculan con la función de proporcionar oportunidades para usos no comerciales, que ejemplifican tales servicios con el uso artístico, estético, educativo, espiritual y/o científico de los ecosistemas. Estos servicios son los beneficios intangibles que las personas obtienen de los ecosistemas, se los reconoce como la contribución de los ecosistemas a beneficios intangibles, como experiencias y habilidades derivadas de las interacciones entre humanos y la ecología (Petersson et al., 2022).

### **2.2.7.4. Servicios de soporte o apoyo.**

Los servicios de soporte o apoyo se determinan por ser necesarios para la producción de los demás servicios ecosistémicos de elaboración primaria, ciclo de nutrientes, aprovisionamiento del entorno, producción de oxígeno en atmósfera y recurso hídrico (Montico et al., 2021).

### **2.2.8 Ecoser**

Es una herramienta diseñada para respaldar la toma de decisiones sobre el uso del suelo y fomentar la investigación, integración interdisciplinaria y la colaboración científica. Se basa en el análisis de los flujos de funciones y servicios ecosistémicos, su interacción y la manera en que son aprovechados por la sociedad, así como en la evaluación de la vulnerabilidad socio – ecológica ante distintos escenarios de pérdida de estos servicios. Esta herramienta opera como un protocolo o conjunto de procedimientos destinados a evaluar, cartografiar y estimar la vulnerabilidad socio – ecológica frente a la degradación de los servicios ecosistémicos Laterra et al. (2011).

### **2.2.9 Sistemas de información geográfica**

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) se define como la integración de datos, métodos, dispositivos, software y personal especializado empleados para el manejo de datos geográficos. Estos sistemas se implementan en entornos informáticos y se utilizan entre otras aplicaciones, en la investigación de las ciencias terrestres. Es de suma importancia destacar que un SIG no se limita solo a ser una base de datos, aunque sí utiliza esta herramienta informática para almacenar la información recolectada (Radicelli et al., 2019).

### **2.2.10 Modelo vectorial**

Es un modelo que se basa en la premisa de que la superficie terrestre está compuesta por elementos discretos como árboles, ríos, lagunas, etc. En lugar de

dividir áreas en unidades fundamentales, este enfoque captura la variabilidad y las características a través de entidades geométricas, donde las propiedades son constantes para cada entidad. Las formas de estas entidades se codifican de forma explícita mediante una serie de formas básicas geométricas como puntos, líneas y polígonos, que representan los elementos prominentes del espacio geográfico (Sanunga, 2021).

### **2.2.11 Modelo ráster**

Es un diseño que se apoya en una cuadrícula de celdas organizadas en filas y columnas, donde cada celda puede contener datos relativos a diversas variables meteorológicas, como la precipitación, temperatura, humedad relativa, radiación solar y las longitudes de onda del espectro electromagnético. No requiere la especificación explícita de las coordenadas de cada celda, sino que se centra en los valores contenidos en ellas. Pese a que estos valores no están asociados de forma directa a una ubicación espacial específica, representan elementos individuales de una malla con una estructura fija y regular. Sin embargo, es crucial posicionarla en el espacio para luego calcular las coordenadas de cada celda (Sanunga, 2021).

### **2.2.12 Modelo de elevación digital (DEM)**

Los modelos digitales de elevación (DEM) han emergido como componentes cruciales en el ámbito de los análisis hidrológicos e hidráulicos. Estos modelos permiten la estimación precisa de características hidrológicas, tales como la dirección del flujo, la cuenca de aporte, la red hidrográfica y otros rasgos geomorfológicos asociados, incluyendo la pendiente y la orientación del terreno. La integración de los MDE con los sistemas de información geográfica (SIG) resulta esencial para la elaboración de mapas de peligrosidad por riesgos hidrometeorológicos, aplicados en múltiples países y abarcando diversas escalas espaciales (Uribe et al., 2018).

### **2.2.13 LandSat 9**

El satélite LandSat 9 representa una colaboración entre el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) y la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), y su propósito es continuar con la función esencial del programa Landsat de realizar observaciones periódicas a nivel global, con el fin de monitorear, comprender y gestionar de manera efectiva los recursos naturales de la Tierra. Está equipado con dos instrumentos científicos: el

Operational Land Imager 2 (OLI-2) y el Thermal Infrared Sensor 2 (TIRS-2). El OLI-2 se encarga de capturar observaciones de la superficie terrestre en diferentes bandas espectrales, mientras que el TIRS-2 mide la radiación infrarroja térmica emitida por la superficie terrestre (Congressional Research Service, 2021).

#### **2.2.14 Landsat 8**

El satélite Landsat 8 es considerado el más novedoso, a medida de su evolución, se ha realizado mayor énfasis en el uso científico de los datos, sumado de requisitos exactos al momento de la interpretación de los instrumentos y la data. Mismos que se difunden en tiempo casi real (NRT), a su vez, incorporan el programa del USGS en el campo de procesamiento medrado por la ESA y así respaldar una cubierta europea constante. El Operational Land Imager (OLI) y el escáner de infrarrojos térmicos (TIRS) sustituyen al instrumento ETM+ del satélite Landsat 7, ofreciendo importantes mejoras en su desempeño (EOS Data Analytics, 2024).

#### **2.2.15 Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)**

El Índice de vegetación de diferencia normalizado o NDVI se basa en la reflectancia de las bandas del espectro electromagnético en el infrarrojo cercano (NIR) y las rojas (red). En la fórmula, NIR representa la reflectancia en el espectro infrarrojo cercano y Red la reflectancia en el espectro rojo. El NDVI se emplea para monitorear los pastizales y su respuesta a las variaciones climáticas, incluso a nivel regional. Este índice ha demostrado tener una fuerte correlación con la biomasa aérea de los pastizales (Nuñez et al., 2021).

#### **2.2.16 Pendiente**

La pendiente de un terreno es uno de los parámetros que más se utiliza cuando se habla del esfuerzo necesario para ascender una ladera empinada de una montaña o para que un automóvil suba una pendiente en una carretera. Este parámetro se define como la relación entre el desnivel ( $\Delta Y$ ) y la distancia horizontal ( $\Delta X$ ) a recorrer. Por lo general, la pendiente se expresa en porcentaje o en grados. Su aplicación en el análisis del terreno se basa en el control del desnivel existente en una ladera ( $\Delta Y$ ) para usar las cotas y observar su variación en el espacio (Ibañez et al., 2011).

## 2.3 Marco legal

### 2.3.1 Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua

#### Asamblea Nacional

#### Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua

Registro Oficial Suplemento 305 de 06-ago.-2014

#### TITULO II

#### RECURSOS HIDRICOS

#### CAPITULO I

#### DEFINICIÓN, INFRAESTRUCTURA Y CLASIFICACION DE LOS RECURSOS HIDRICOS

**Art. 10.-** Dominio hídrico público. El dominio hídrico público está constituido por los siguientes elementos naturales:

- a) Los ríos, lagos, lagunas, humedales, nevados, glaciares y caídas naturales;
- b) El agua subterránea;
- c) Los acuíferos a los efectos de protección y disposición de los recursos hídricos;
- d) Las fuentes de agua, entendiéndose por tales las nacientes de los ríos y de sus afluentes, manantial o naciente natural en el que brota a la superficie el agua subterránea o aquella que se recoge en su inicio de la escorrentía;
- e) Los álveos o cauces naturales de una corriente continua o discontinua que son los terrenos cubiertos por las aguas en las máximas crecidas ordinarias;
- f) Los lechos y subsuelos de los ríos, lagos, lagunas y embalses superficiales en cauces naturales;
- g) Las riberas que son las fajas naturales de los cauces situadas por encima del nivel de aguas bajas;
- h) La conformación geomorfológica de las cuencas hidrográficas, y de sus desembocaduras;
- i) Los humedales marinos costeros y aguas costeras; y,
- j) Las aguas procedentes de la desalinización de agua de mar.

Las obras o infraestructura hidráulica de titularidad pública y sus zonas de protección hidráulica se consideran parte integrante del dominio hídrico público (pág.5).

(Asamblea Nacional del Ecuador, 2014, Art. 10)

### 2.3.2 Código Orgánico del Ambiente

#### Código Orgánico del Ambiente

Registro Oficial Suplemento 983 de 12-abr.-2017

#### CAPITULO II

#### DEL SISTEMA NACIONAL DE AREAS PROTEGIDAS

**Art. 37.-** Del Sistema Nacional de Areas Protegidas. El Sistema Nacional de Areas Protegidas estará integrado por los subsistemas estatal, autónomo descentralizado, comunitario y privado. Su declaratoria, categorización, recategorización, regulación y administración deberán garantizar la conservación, manejo y uso sostenible de la biodiversidad, así como la conectividad funcional de los ecosistemas terrestres, insulares, marinos, marino-costeros y los derechos de la naturaleza.

Las áreas protegidas serán espacios prioritarios de conservación y desarrollo sostenible. Los Gobiernos Autónomos Descentralizados deberán incorporar las áreas protegidas a sus herramientas de ordenamiento territorial.

En las áreas protegidas se deberán establecer limitaciones de uso y goce a las propiedades existentes en ellas y a otros derechos reales que sean necesarias para

asegurar el cumplimiento de sus objetivos de conservación. El Estado evaluará, en cada caso, la necesidad de imponer otras limitaciones.

Se prohíbe el fraccionamiento de la declaratoria de áreas protegidas. Sin perjuicio de lo anterior, los posesionanos regulares o propietarios de tierras dentro de un área protegida, que lo sean desde antes de la declaratoria de la misma, mantendrán su derecho a enajenar, fraccionar y transmitir por sucesión estos derechos sobre estas tierras. Con respecto del fraccionamiento de tierras comunitarias se observarán las restricciones constitucionales.

El Estado asignará los recursos económicos necesarios para la sostenibilidad financiera del Sistema Nacional de Areas Protegidas. Se podrán gestionar estrategias y fuentes complementarias.

La Autoridad Ambiental Nacional realizará evaluaciones técnicas periódicas con el fin de verificar que las áreas protegidas cumplan con los objetivos reconocidos para las mismas. De ser necesario y considerando los resultados de dichas evaluaciones técnicas, la Autoridad Ambiental Nacional podrá redelimitarlas o cambiarlas de categoría bajo las consideraciones técnicas, según corresponda (pág.16). (Asamblea Nacional del Ecuador, 2017, Art. 37)

### **3. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1 Enfoque de la investigación**

##### **3.1.1 Tipo y alcance de la investigación**

Esta investigación fue de tipo descriptiva y documental centrándose en la compilación de información de imágenes satelitales por medio de SIGs del Parque Nacional Cajas. El objetivo fue evaluar de manera precisa y detallada por medio del servicio ecosistémico el control de erosión presente en el sitio de estudio.

###### **3.1.1.1. Investigación documental.**

Se dio la utilización de referencias bibliográficas, por consecuente de artículos científicos, artículos de revistas científicas y libros, de esta manera poder justificar los conocimientos y percepciones de autores en relación al control de erosión hídrica y los servicios ecosistémicos.

###### **3.1.1.2. Investigación descriptiva.**

Se determinó mediante los datos compilados el control de erosión mediante la ecuación establecida, de esta manera se pudo determinar la vulnerabilidad del parque frente a este impacto ambiental.

##### **3.1.2 Diseño de investigación**

El estudio no dispone con un diseño experimental debido a que se basó solo en la investigación descriptiva para la compilación de información de diferentes organizaciones inclinados a la inquisición de los servicios ecosistémicos, recurso hídrico y el suelo.

#### **3.2 Metodología**

##### **3.2.1 Variables a medir**

###### **3.2.1.1. Variable independiente.**

Corresponde a la pendiente topográfica de la zona de estudio medida en porcentaje, en una escala de 0 a 1.

###### **3.2.1.2. Variable dependiente.**

###### **3.2.1.2.1. Control de erosión.**

El protocolo Ecoser propone un método de estimación relativa que incorpora un modelo integral, mismo que tiene en cuenta la biomasa indicada por el NDVI, así como factores físicos como la pendiente del terreno y la estabilidad de la cobertura en el tiempo (12 meses del año). Se mide en unidades relativas.

### 3.2.1.2.2. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).

Se utilizó una operación algebraica para calcular los valores de reflectancia en diferentes longitudes de onda. La diferencia normalizada minimiza los efectos topográficos y establece una escala lineal que varía entre  $-1$  a  $1$ , donde los valores negativos indican ausencia de vegetación y los valores positivos indican presencia de vegetación.

### 3.2.1.2.3. Coeficiente de estabilidad ( $CV_{(NDVI)}$ ).

Este coeficiente refleja la variación estacional de la biomasa a lo largo de un año, en un rango de  $0$  –  $1$ . Este coeficiente pudo calcularse usando los mismos rásteres empleados para estimar la biomasa, se dividió el promedio de la biomasa por su desviación estándar.

### 3.2.1.3. Matriz de operacionalización de variables

**Tabla 1.**

**Matriz de operacionalización de la variable independiente.**

| Variable independiente |              |                 |                       |
|------------------------|--------------|-----------------|-----------------------|
| Variables              | Tipo         | Nivel de medida | Descripción           |
| Pendiente del terreno  | Cuantitativa | Continua        | Se mide en porcentaje |

**Elaborado por:** La Autora, 2025

**Tabla 2.**

**Matriz de operacionalización de la variable dependiente.**

| Variable dependiente                                  |              |                 |                                              |
|-------------------------------------------------------|--------------|-----------------|----------------------------------------------|
| Variables                                             | Tipo         | Nivel de medida | Descripción                                  |
| Control de Erosión                                    | Cuantitativa | Continua        | Se mide en unidades                          |
| Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) | Cuantitativa | Continua        | relativas<br>Se mide en escala de $-1$ – $1$ |
| Coeficiente de estabilidad                            | Cuantitativa | Continua        | Se mide en escala de $0$ – $1$               |

**Elaborado por:** La Autora, 2025

### 3.2.2 Recolección de datos

Los datos recolectados por medio digital en diferentes plataformas como shapefile, pdf, entre otros, además del apoyo como geoportales gubernamentales, geoespaciales y el uso del software QGIS.

### 3.2.3 Recursos

Los materiales empleados para el desarrollo del proyecto de investigación fueron:

- Cámara (móvil)
- Software (QGIS)
- Google Earth Engine
- Sigtierras
- Ministerio de Agricultura y Ganadería
- Materiales de oficina
- Cartografía digital

#### 3.2.3.1. Recursos bibliográficos.

Este trabajo se basó en la recopilación de información digital por medio de artículos científicos, de revista, libros, sitios web, y datos para el análisis de las imágenes satelitales de Landsat 8 y 9 por medio de la plataforma de Google Earth Engine, además se utilizó la herramienta QGIS 3.36 Maidenhead para el respectivo procesamiento de las variables en este estudio.

#### 3.2.3.2. Recursos económicos.

Los gastos del proyecto se financiaron por cuenta del encargado del proyecto en general como transporte, alimentación para el trabajo en campo, por otro lado, la tesista financió gastos como: papelería, impresiones, entre otros.

**Tabla 3.**

#### ***Presupuesto de recursos materiales del proyecto.***

| <b>Materiales</b>     | <b>Cantidad</b> | <b>Valor unitario</b> | <b>Valor total</b> |
|-----------------------|-----------------|-----------------------|--------------------|
| Transporte            | 2               | 100                   | 130                |
| Alimentación          | 2               | 45                    | 90                 |
| Materiales de oficina | 1               | 100                   | 150                |
| Cartografía digital   | 2               | 100                   | 200                |
| <b>Total</b>          |                 |                       | <b>\$570,00</b>    |

**Elaborado por:** La Autora, 2025



### 3.2.3.3. Recursos humanos.

El cumplimiento de este proyecto de investigación estuvo a cargo de la autora, además de la ayuda profesional de la docente tutor perteneciente a la Universidad Agraria del Ecuador, misma que se encargó de dar seguimiento en la realización y evaluación del estudio con el objetivo de cumplir con los objetivos propuestos.

### 3.2.3.4. Métodos y técnicas.

#### 3.2.3.4.1. Métodos de investigación.

**Método investigativo:** Este método permitió la recolección de información bibliográfica de fuentes científicas confiables que ayudaron con la recopilación de información bajo los objetivos propuestos.

**Método inductivo:** Este método permitió realizar el análisis de resultados a través de observaciones dentro del estudio con la finalidad de cumplir los objetivos planteados.

**Método descriptivo:** Este método permitió mediante la recopilación de datos bibliográficos y cartográficos describir cada variable planteada.

#### 3.2.3.4.2. Técnicas de investigación.

**Objetivo 1:** “Ejecutar el levantamiento de información requerida para el modelo ecosistémico en el Parque Nacional Cajas”.

#### Área de estudio

El estudio se realizó en el Parque Nacional Cajas mismo que se encuentra ubicado en el cantón Cuenca, provincia del Azuay, Km. 13.5 vía Cuenca – Molleturo – Puerto Inca, al sur del Ecuador, con una extensión de 285.4 km<sup>2</sup> con un rango altitudinal de 3160 – 4450 metros.

**Tabla 4.**

#### **Coordenadas UTM del Parque Nacional Cajas.**

| <b>Coordenadas Geográficas del Parque Nacional Cajas</b> |              |
|----------------------------------------------------------|--------------|
| Latitud                                                  | 2°47'00.6"S  |
| Longitud                                                 | 79°12'55.8"W |
| Altitud                                                  | 3936         |

**Fuente:** Toulkeridis, Echeagaray y Martinez (2021). **Elaborado por:** La Autora, 2025

### **Revisión bibliográfica e información digital**

Se necesitó de recursos digitales del campo de estudio, tales como bases de datos geográficos, archivos shapefile y datos obtenidos de diversas entradas de información geográfica de entidades gubernamentales locales y globales. De igual manera, se requirió el respaldo de fuentes bibliográficas confiables, como libros, artículos científicos y revistas, que fundamentó las bases teóricas establecidas.

Datos geoespaciales disponibles, con respecto a la planificación de campo se realizaron las visitas al Parque Nacional Cajas para la georreferenciación del mismo; para la obtención de las imágenes satelitales se utilizó la plataforma Google Earth Engine (GEE) con respecto al satélite Landsat 8 para el año 2023 y Landsat 9 para el año 2024, al igual que los datos de clasificación de cobertura y uso del suelo (LULC). El modelo digital de elevación (DEM) se adquirió del geoportal gubernamental "SIGTIERRAS" en conjunto al Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). La toma de estos datos fue necesaria para poder determinar las variables presentes en la investigación, hacer uso de herramientas como QGIS y así poder evaluar la función ecosistémica control de erosión hídrica propuesta por Ecoser.

### **Imágenes satelitales**

Para la obtención de las imágenes satelitales se necesitó la plataforma Google Earth Engine (GEE) (Fariz et al., 2022), misma donde se obtuvo acceso y disponibilidad de satélites. En este estudio se utilizó el satélite Landsat 8 (USGS Landsat 8 Level 2, Collection 2, Tier 1) para el año 2023 y Landsat 9 (USGS Landsat 9 Level 2, Collection 2, Tier 1) para el año 2024, ambas con resolución de 30 metros. Se emplearon algunos filtros en la obtención de estas imágenes tales como: ubicación, rango de fechas de búsqueda, función para el cálculo del NDVI usando las bandas NIR (B5) y Red (B4), mediana de la colección de imágenes de NDVI, escala, porcentaje de nubosidad, código y fecha de cada imagen. Adicional a ello, se necesitó del programa QGIS 3.36 Maidenhead para el análisis de las imágenes y procesamiento.

Se utilizó una capa vectorial para la zona de estudio. El corte se realizó sobreponiendo el shape con la imagen satelital respectiva para cada año (mensual).

**Tabla 5.*****Bandas de las imágenes satelitales Landsat 8.***

| Sensor | Band number | Band name    | Wavelength ( $\mu\text{m}$ ) | Resolution (m) | Band Applications                                                                                                  |
|--------|-------------|--------------|------------------------------|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| OLI    | 1           | Costero<br>o | 0.43 – 0.45                  | 30             | Estudios costeros y de aerosoles.                                                                                  |
| OLI    | 2           | Azul         | 0.45 – 0.51                  | 30             | Mapeo barimétrico, que distingue el suelo de la vegetación y la vegetación caducifolia de la conífera.             |
| OLI    | 3           | Verde        | 0.53 – 0.59                  | 30             | Destaca la vegetación máxima, lo que es útil para evaluar el vigor de las plantas.                                 |
| OLI    | 4           | Rojo         | 0.63 – 0.67                  | 30             | Discrimina las pendientes de la vegetación                                                                         |
| OLI    | 5           | NIR          | 0.85 – 0.88                  | 30             | Destaca el contenido de biomasa y las costas.                                                                      |
| OLI    | 6           | (SWIR<br>1)  | 1.57 – 1.65                  | 30             | Discrimina el contenido de humedad del suelo y la vegetación; penetra nubes delgadas.                              |
| OLI    | 7           | (SWIR<br>2)  | 2.11 – 2.29                  | 30             | Capacidad mejorada para rastrear el contenido de humedad del suelo, la vegetación y penetración de nubes delgadas. |
| OLI    | 8           | Pan          | 0.50 – 0.68                  | 30             | Resolución de 15 metros, definición de imagen más nítida.                                                          |
| OLI    | 9           | Cirrus       | 1.36 – 1.38                  | 30             | Detección mejorada de contaminación por cirrus.                                                                    |
| TIRS   | 10          | TIRS 1       | 10.60 – 11.19                | 30             | Resolución de 100 metros, mapeo térmico y humedad estimada del suelo.                                              |
| TIRS   | 11          | TIRS 2       | 11.50 – 12.51                | 30             | Resolución de 100 metros, mapeo térmico y humedad estimada del suelo.                                              |

**Fuente:** EOS Data Analytics (2024). **Elaborado por:** La Autora, 2025

Tabla 6.

***Bandas de las imágenes satelitales Landsat 9.***

| <b>Sensor</b> | <b>Número de banda</b> | <b>Nombre de la banda</b>           |
|---------------|------------------------|-------------------------------------|
| OLI           | 1                      | Aerosol Costero                     |
| OLI           | 2                      | Visible Azul                        |
| OLI           | 3                      | Visible Verde                       |
| OLI           | 4                      | Visible Rojo                        |
| OLI           | 5                      | Infrarrojo Cercano (NIR)            |
| OLI           | 6                      | Infrarrojo de onda corta 1 (SWIR 1) |
| OLI           | 7                      | Infrarrojo de onda corta 2 (SWIR 2) |
| OLI           | 8                      | Pancromática                        |
| OLI           | 9                      | Cirrus                              |
| TIRS          | 10                     | Sensor Térmico Infrarrojo 1         |
| TIRS          | 11                     | Sensor Térmico Infrarrojo 2         |

Fuente: Ramos (2022).

Elaborado por: La Autora, 2025

**Modelo digital de elevación (DEM)**

El modelo digital de elevación (DEM) se obtuvo desde el geportal gubernamental de "SIGTIERRAS" en conjunto al Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) con el sistema de coordenadas WSG 1984 UTM 17S, con una escala de 1.150.000, con el propósito de determinar la pendiente topográfica.

**Objetivo 2:** "Estimar el nivel de control de erosión existente en el Parque Nacional El Cajas por medio de Sistemas de Información Geográfica".

**Protocolo ECOSER**

El protocolo Ecoser permite la evaluación y el mapeo de los servicios ecosistémicos y la susceptibilidad socio – ecológica para el ordenamiento territorial. Este método permite evaluar funciones ecosistémicas (FE) y servicios ecosistémicos (SE). En este caso, una de las 5 FE que propone este protocolo es el control de erosión hídrica.

**Control de erosión hídrica**

Esta función ecosistémica que pertenece a los servicios ecosistémicos de regulación, es un indicador que hace parte del modelo de estimación relativa de los servicios ecosistémicos planteada por Carreño et al. (2012) y Viglizzo et al. (2011) los insumos requeridos para el cálculo de la ecuación son: NDVI (biomasa) y su

estabilidad en el tiempo ( $CV_{(NDVI)}$ , coeficiente de variación de la biomasa) y la pendiente.

Para la biomasa se utilizó una capa ráster cuyo valor del píxel considere la biomasa en unidades relativas (0 – 100). Para ello, se usó imágenes mensualizadas del satélite Landsat 8 para el año 2023 y Landsat 9 para el año 2024, teniendo en cuenta que la biomasa representa el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).

El coeficiente de estabilidad equivale a la variación estacional en la biomasa durante un año (0 – 1), los valores próximos a 1 se ajustan a una mayor variación de biomasa dentro del año, por otro lado, los valores próximos a 0 representan una menor variación de biomasa dentro del año.

Por último, para la pendiente se dio uso de una capa cuyo valor del píxel sea la pendiente ponderada en una escala de (0 – 1). La capacidad de protección es más notable en áreas con pendientes suaves y se reduce conforme la pendiente aumenta. En consecuencia, la pendiente de mayor magnitud es la que mayor carga de biomasa aporta.

Ecuación:

$$EC = (NDVI) * (1 - CV_{(NDVI)}) * (1 - F_p) \quad (1)$$

Donde:

- EC**: Control de erosión (unidades relativas).
- NDVI**: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en una escala de (0 – 100).
- **$CV_{(NDVI)}$** : Coeficiente de Variación de NDVI, calculado en base a los 12 meses del año ( $n = 12$ ), en una escala de (0 – 1).
- **$F_p$** : Pendiente del terreno de la zona de estudio, en una escala (0 – 1), calculado a partir del modelo digital de elevación (DEM).

Para esta ecuación, fue imprescindible obtener varias imágenes Landsat a lo largo del año 2023 y 2024 con el fin de calcular el coeficiente de variación de la biomasa.

El control de erosión hídrica fue representado mediante la siguiente tabla de clasificación adaptada del índice de control de erosión hídrica (EC) basada en criterios de estabilidad ecológica, cobertura vegetal y pendiente. Elaboración propia, con apoyo de herramientas de análisis estadístico y SIG.

Tabla 7.

**Clasificación adaptada del índice de control de erosión hídrica (EC).**

| <b>Categoría</b> | <b>Rango de valores (EC)</b> | <b>Descripción</b>                                                                |
|------------------|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Muy bajo         | 0 – 20                       | Suelos desnudos, escasa estabilidad y pendientes extremas.                        |
| Bajo             | 20 – 40                      | Vegetación escasa, alta variabilidad del NDVI y pendientes fuertes.               |
| Moderado         | 40 – 60                      | Cobertura vegetal intermedia, estabilidad baja o pendientes pronunciadas.         |
| Alto             | 60 – 80                      | Buena cobertura vegetal, estabilidad moderada y pendientes intermedias.           |
| Muy alto         | >80                          | Ecosistemas con excelente cobertura vegetal, alta estabilidad y pendientes bajas. |

**Elaborado por:** La Autora, 2025

**NDVI (biomasa)**

El NDVI establece una escala lineal de -1 a 1. En esta escala, los valores negativos indican ausencia de vegetación, mientras que los valores positivos indican presencia de vegetación. Para ello, mediante la plataforma de Google Earth Engine con “scripts” se descargó la colección de imágenes satelitales Landsat 8 y 9 junto con la función para el cálculo del NDVI usando las bandas NIR (B5) y Red (B4), mediana de la colección de imágenes con NDVI y visualización del NDVI: min, max.

**Coefficiente de estabilidad (variación de NDVI (biomasa))**

Este parámetro indica la variación estacional de la biomasa dentro de un año, expresado en un rango de 0 – 1. Se calcula al usar los mismos datos ráster utilizados para estimar la biomasa, dividiendo la media por la desviación estándar. El coeficiente de variación es la relación entre la desviación estándar y la media de un conjunto específico de valores.

**Pendiente topográfica**

Este proceso consistió en producir un archivo ráster que contuvo información sobre la pendiente topográfica de la zona del Parque Nacional Cajas. Implicó el uso de la plataforma gubernamental “SIGTIERRAS” y el MAG (Ministerio de Agricultura

y Ganadería (MAG) para realizar la descarga del modelo digital de elevación (DEM) y poder determinarla en QGIS. Esta variable se presenta en un rango de valores de pendiente apoyados en los cortes de clasificación utilizados al ejecutar la herramienta de “pendiente” del algoritmo de Phyton “GDAL” expresada en porcentaje, para luego reescalar el ráster en un rango de 0 – 1.

**Tabla 8.**

***Clases y rangos de pendientes.***

| <b>Clase</b> | <b>Descripción</b> | <b>Porcentaje</b> |
|--------------|--------------------|-------------------|
| 1            | Plano              | 0 – 5             |
| 2            | Suave              | 5 – 12            |
| 3            | Moderada           | 12 – 25           |
| 4            | Fuerte             | 25 – 50           |
| 5            | Muy fuerte         | 50 – 70           |
| 6            | Abrupta            | > 70              |

**Fuente:** Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca [MAGAP], (2012). **Elaborado por:** La Autora, 2025

**Objetivo 3:** “Proponer un plan de gestión del suelo de las áreas vulnerables para mitigar su degradación”, se realizó actividades como la evaluación o diagnóstico de los recursos del Parque Nacional Cajas, tanto elementos biofísicos como socio – económicos. El análisis del estado en que se encontró esta área, a su vez, la problemática que ocurre dentro del mismo y como respuesta a este problema, una correcta planificación incluyendo programa de mejoras para la conservación del parque.

### **3.2.4 Análisis estadístico**

En el estudio se realizó el análisis estadístico descriptivo de las variables, mismas que son la reflectancia del NDVI (biomasa) de los años 2023 y 2024, la pendiente topográfica del área en cuestión, para lograr la estimación del servicio ecosistémico “control de erosión hídrica”, dando el uso correcto a las técnicas de Sistemas de Información Geográfica.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Análisis de datos digitales utilizando plataformas satelitales para el modelo ecosistémico en el Parque Nacional Cajas

#### 4.1.1 Obtención de datos de las imágenes satelitales Landsat 8 con NDVI correspondiente al año 2023

La descarga digital de las imágenes satelitales Landsat 8, Level 2, Collection 2, Tier 1 se dio por medio del geoportal Google Earth Engine (GEE). Para el año 2023 se realizó la descarga de imágenes satelitales con scripts (códigos) proporcionados en la misma plataforma. Los códigos son los siguientes: `ee.FeatureCollection` (para cargar el shapefile), `ee.ImageCollection:LANDSAT/LC08/C02/T1_L2` (para la descarga de la imagen satelital), `filter date` (fechas de búsqueda), función para calcular el NDVI usando las bandas NIR (B5) y Red (B4) [`'SR_B5'`, `'SR_B4'`]], `landsat8.map (addNDVI)` (para el mapeo de la función sobre la colección de imágenes), `landsatWithNDVI.select (NDVI).median` (para tomar la mediana de la colección de imágenes), `Export.image.toDrive` (para exportar la imagen, especificando escala (30), región (shapefile)) y `Map.addLayer (medianNDVI, {min: 0, max: 1, palette: ['white', 'green']}, 'NDVI');` `Map.centerObject (shapefile); Map.addLayer (shapfile, {color: 'blue'}, 'Área de tu shapefile')`. En la Tabla 9 se puede observar la descripción general de las imágenes en los meses de enero, febrero, marzo, mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre y diciembre.

#### Tabla 9.

#### *Descripción general de los rásteres NDVI mensuales del año 2023 para cálculo del control de erosión (EC).*

| Código de imagen     | Mes        | Fecha      | Nubosidad (%) |
|----------------------|------------|------------|---------------|
| LC08_010062_20230124 | Enero      | 2023-01-24 | 84.95         |
| LC08_010062_20230209 | Febrero    | 2023-02-09 | 56.77         |
| LC08_010062_20230313 | Marzo      | 2023-03-13 | 70.25         |
| LC08_010062_20230516 | Mayo       | 2023-05-16 | 59.21         |
| LC08_010062_20230617 | Junio      | 2023-06-17 | 54.39         |
| LC08_010062_20230703 | Julio      | 2023-07-03 | 57.61         |
| LC08_010062_20230804 | Agosto     | 2023-08-04 | 69.71         |
| LC08_010062_20230905 | Septiembre | 2023-09-05 | 78.33         |
| LC08_010062_20231007 | Octubre    | 2023-10-07 | 33.71         |
| LC08_010062_20231108 | Noviembre  | 2023-11-08 | 80.41         |
| LC08_010062_20231210 | Diciembre  | 2023-12-10 | 67.18         |

**Elaborado por:** La Autora, 2025



#### **4.1.2 Obtención de datos de las imágenes satelitales Landsat 9 correspondiente al año 2024**

La descarga digital de las imágenes satelitales Landsat 9 Level 2, Collection 2, Tier 1 se realizó por medio de la plataforma Google Earth Engine. Por su parte, para el año 2024 también se descargó las imágenes satelitales de esta plataforma con los mismos scripts (códigos) que se dio uso para el año 2023. Los scripts son: `ee.FeatureCollection` (para cargar el shapfile), `ee.ImageCollection:LANDSAT/LC09/C02/T1_L2` (para la descarga de la imagen satelital), `filter date` (fechas de búsqueda), función para calcular el NDVI usando las bandas NIR (B5) y Red (B4) [`'SR_B5'`, `'SR_B4'`], `landsat9.map (addNDVI)` (para el mapeo de la función sobre la colección de imágenes), `landsatWithNDVI.select (NDVI).median` (para tomar la mediana de la colección de imágenes), `Export.image.toDrive` (para exportar la imagen, especificando escala (30), región (shapefile)) y `Map.addLayer (medianNDVI, {min: 0, max: 1, palette: ['white', 'green']}, 'NDVI');` `Map.centerObject (shapefile);` `Map.addLayer (shapfile, {color: 'blue'}, 'Área de tu shapefile')`. En la Tabla 10 se puede observar la descripción general de las imágenes en los meses de enero, febrero, marzo, abril, mayo, julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre y diciembre.

**Tabla 10.**

***Descripción general de los rásteres NDVI mensuales del año 2024 para cálculo del control de erosión (EC).***

| <b>Código de imagen</b> | <b>Mes</b> | <b>Fecha</b> | <b>Nubosidad (%)</b> |
|-------------------------|------------|--------------|----------------------|
| LC09_010062_20240103    | Enero      | 2024-01-03   | 76.26                |
| LC08_010062_20240204    | Febrero    | 2024-02-04   | 75.8                 |
| LC08_010062_20240323    | Marzo      | 2024-03-23   | 75.53                |
| LC08_010062_20240424    | Abril      | 2024-04-24   | 65.41                |
| LC08_010062_20240510    | Mayo       | 2024-05-10   | 76.48                |
| LC08_010062_20240729    | Julio      | 2024-07-29   | 73.91                |
| LC08_010062_20240814    | Agosto     | 2024-08-14   | 54.81                |
| LC08_010062_20240915    | Septiembre | 2024-09-15   | 74.53                |
| LC08_010062_20241017    | Octubre    | 2024-10-17   | 45.54                |
| LC08_010062_20241118    | Noviembre  | 2024-11-18   | 79.5                 |
| LC08_010062_20241204    | Diciembre  | 2024-12-04   | 73.81                |

**Elaborado por:** La Autora, 2025

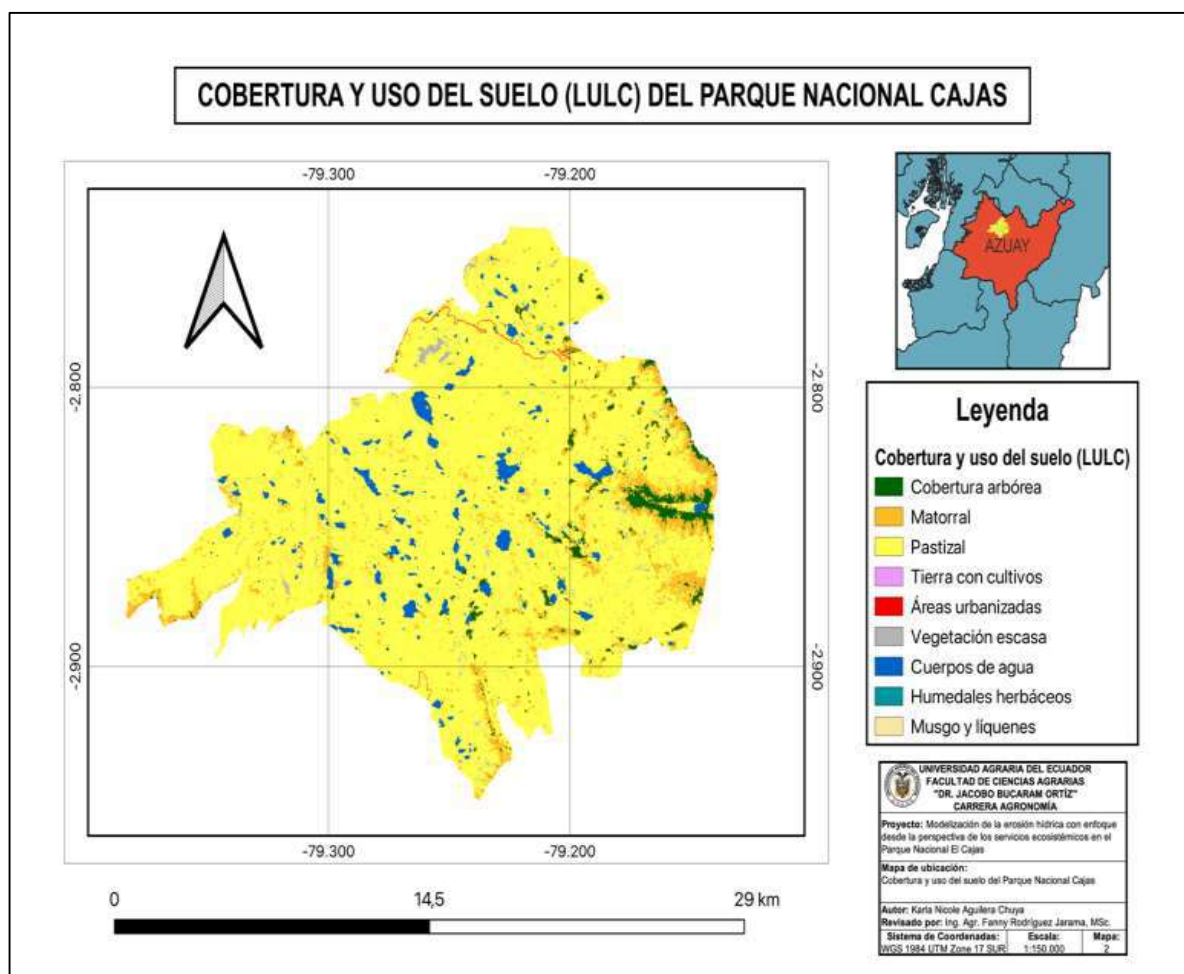
### 4.1.3 Información de cobertura y uso de suelo

Para la obtención de los datos sobre cobertura y uso de suelo (LULC) del área de estudio “Parque Nacional Cajas” se utilizó la herramienta de Google Earth Engine (GEE) misma donde se descargó un shapefile del conjunto de datos colección “ESA WorldCover 10m v100” con una resolución de 10 metros, tomada por el satélite Sentinel 1 misma que corresponde al periodo de enero 2020 – 2021. La clasificación de las clases de cobertura y uso del suelo se puede observar en la Tabla 21 en Anexos.

En la Figura 1 se evidencia que en el parque existen un total de 9 tipos de cobertura que incluyen pastizales, matorral, cuerpos de agua permanentes, cobertura arbórea, vegetación escasa, humedales herbáceos, áreas urbanizadas, tierras con cultivo, musgo y líquenes.

**Figura 1.**

**Mapa de cobertura y uso del suelo del Parque Nacional Cajas.**



**Elaborado por:** La Autora, 2025

En la Tabla 11 se puede evidenciar que los datos denotan mayor presencia de coberturas como pastizales con un 84.08% seguido de coberturas en menor proporción: matorral con 8.36%, cuerpos de agua con un 3.25%, cobertura arbórea con 2.24%, vegetación escasa con 1.61%, humedales herbáceos con 0.32%, áreas urbanizadas con 0.14%, tierras con cultivo, musgo y líquenes con 0.001%.

**Tabla 11.**

***Tipos de coberturas en Parque Nacional Cajas.***

| <b>Cobertura</b>    | <b>Perímetro (m)</b> | <b>Área (m<sup>2</sup>)</b> | <b>Hectáreas</b> | <b>Porcentaje (%)</b> |
|---------------------|----------------------|-----------------------------|------------------|-----------------------|
| Pastizales          | 2267479              | 239997952                   | 23999.80         | 84.08                 |
| Matorral            | 1667689              | 23862784                    | 2386.28          | 8.36                  |
| Cuerpos de agua     | 235155               | 9276800                     | 927.68           | 3.25                  |
| Cobertura arbórea   | 296169               | 6393856                     | 639.39           | 2.24                  |
| Vegetación escasa   | 650991               | 4595584                     | 459.56           | 1.61                  |
| Humedales herbáceos | 171680               | 913408                      | 91.34            | 0.32                  |
| Áreas urbanizadas   | 51271                | 399616                      | 29.96            | 0.14                  |
| Tierras con cultivo | 638                  | 2854                        | 0.29             | 0.001                 |
| Musgo y líquenes    | 299                  | 2854                        | 0.29             | 0.001                 |
| <b>Total</b>        |                      |                             | <b>28544</b>     | <b>100</b>            |

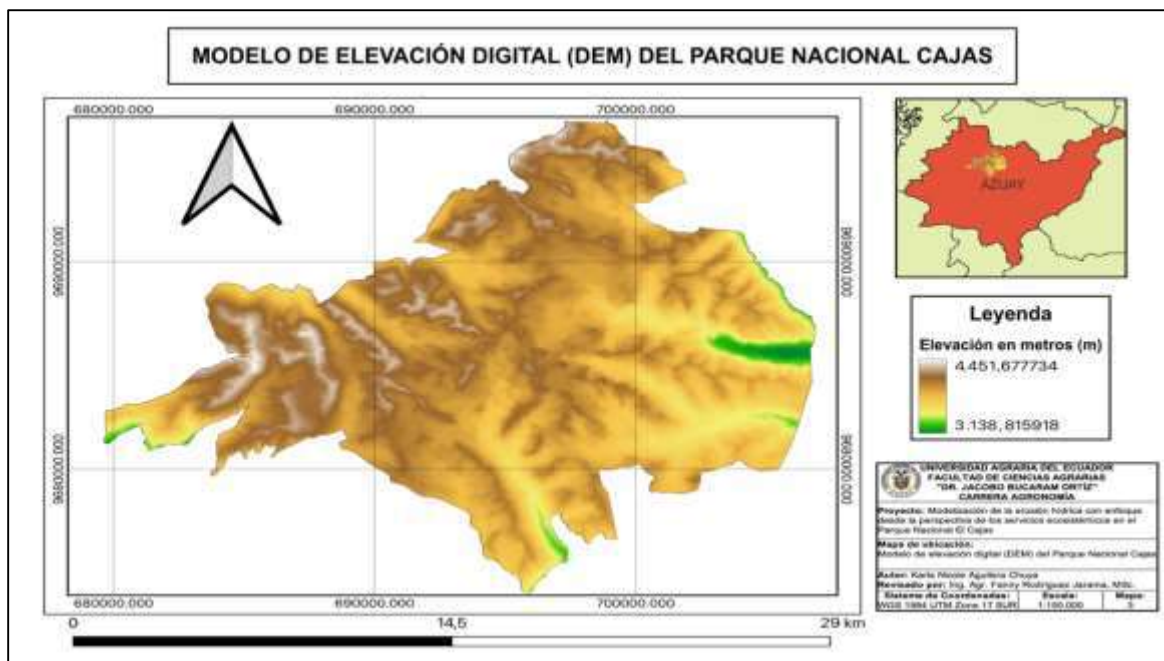
**Fuente:** Google Earth Engine (2021).

**Elaborado por:** La Autora, 2025

#### ***4.1.4 Modelo digital de elevación (DEM)***

Se obtuvo desde la plataforma gubernamental “Sigtierras” junto al Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) con el sistema de coordenadas WSG 1984 zona 17S, en la Figura 2 puede apreciarse la elevación del terreno del Parque Nacional Cajas el cual asistió al cálculo de la pendiente.

Figura 2.

**Mapa del modelo de elevación digital (DEM) del Parque Nacional Cajas.**

**Elaborado por: La autora, 2025**

En la Tabla 12 se describe el análisis estadístico del modelo digital de elevación del Parque Nacional Cajas el cual posee elevaciones que van desde de los 3138.81 msnm, hasta los 4451.67 msnm, una elevación promedio de 2906.24 m, una altitud notable lo cual es característico de la cordillera de los Andes. Entre las elevaciones mencionadas el rango es de 1316.72 msnm, con respecto a la desviación estándar se determinó un valor de 204.26 m, esto refleja la variabilidad en las elevaciones que están en la zona, lo que sugiere que las altitudes de la zona presentan fluctuaciones alrededor de este valor próximo. Por su lado, la varianza de 41723.40 m enfatiza aún más la complejidad topográfica intrínseca a la cadena montañosa del parque.

**Tabla 12.****Estadística descriptiva del modelo digital de elevación (DEM).**

| Clasificación estadística | Valores (msnm) |
|---------------------------|----------------|
| Mínimo                    | 3138.81        |
| Máximo                    | 4451.67        |
| Media (promedio)          | 3906.24        |
| Intervalo (rango)         | 1316.82        |
| Desviación estándar       | 204.26         |
| Varianza                  | 41723.40       |

**Elaborado por: La Autora, 2025**

#### **4.1.5 Descripción de la reflectancia del NDVI del año 2023**

El análisis estadístico correspondiente al índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), derivado de la reflectancia capturada por el satélite Landsat 8, mostró una variabilidad temporal significativa en sus estimaciones a lo largo del 2023 para evaluar la biomasa, es decir, el estado de la vegetación en la zona de estudio.

La Tabla 13 demuestra que los valores del NDVI oscilaron entre 0.00010 (mínimo) y 0.33 (máximo), con una media de 0.05, un rango de 0.33, y una desviación estándar de 0.02 lo que significa que estos valores se aproximan al promedio. Estos resultados reflejan que se encuentran en un rango con valores  $< 0.1$  y  $0.3$ , los valores cercanos a 0 están asociados a zonas con cuerpos de agua, como las lagunas presentes en el parque nubes (% de nubosidad en las imágenes satelitales), mientras que los  $\geq 3$  indican a zonas con cobertura vegetal densa o activa como es el caso de los pastizales en su gran mayoría. Estos valores ofrecen un mayor nivel de detalle con respecto al monitoreo del control de erosión dentro del Parque Nacional Cajas.

**Tabla 13.**

#### ***Estadística descriptiva de la media del NDVI del año 2023.***

| <b>Clasificación estadística</b> | <b>Valores</b> |
|----------------------------------|----------------|
| Mínimo                           | 0.00010        |
| Máximo                           | 0.33           |
| Media (promedio)                 | 0.05           |
| Rango                            | 0.33           |
| Suma                             | 16609.86       |
| Desviación estándar              | 0.02           |
| Varianza                         | 0.0007         |

**Elaborado por:** La Autora, 2025

#### **4.1.6 Descripción de la reflectancia del NDVI del año 2024**

La Tabla 14 refleja los valores del NDVI que oscilan entre 0.010 como mínimo, y 0.29 como máximo, una media de 0.08, lo que advierte que, en promedio, las condiciones de vegetación son “moderadas a bajas”, el rango con 0.28, evidencia la variabilidad absoluta en los datos, y la desviación estándar que es 0.02, señala que los valores del NDVI están un tanto agrupados en torno al promedio,

esto refleja una baja dispersión en los datos arrojados. Los datos manifiestan que están en un rango con valores  $< 0.1$  y  $0.3$ , los valores cercanos a 0 están asociados a zonas con cuerpos de agua, como las lagunas presentes en el parque nubes (% de nubosidad en las imágenes satelitales), en este caso, se debe considerar los acontecimientos suscitados en el mes de noviembre debido a los incendios forestales, lo cual también influyó en estos resultados. Mientras que los  $\geq 3$  indican a zonas con cubierta densa o presente como es el caso de los pastizales en su gran mayoría, al igual que en el año 2023.

**Tabla 14.**

***Estadística descriptiva del NDVI del año 2024.***

| <b>Clasificación estadística</b> | <b>Valores</b> |
|----------------------------------|----------------|
| Mínimo                           | 0.010          |
| Máximo                           | 0.29           |
| Media (promedio)                 | 0.08           |
| Rango                            | 0.28           |
| Suma                             | 27239.38       |
| Desviación estándar              | 0.02           |
| Varianza                         | 0.0007         |

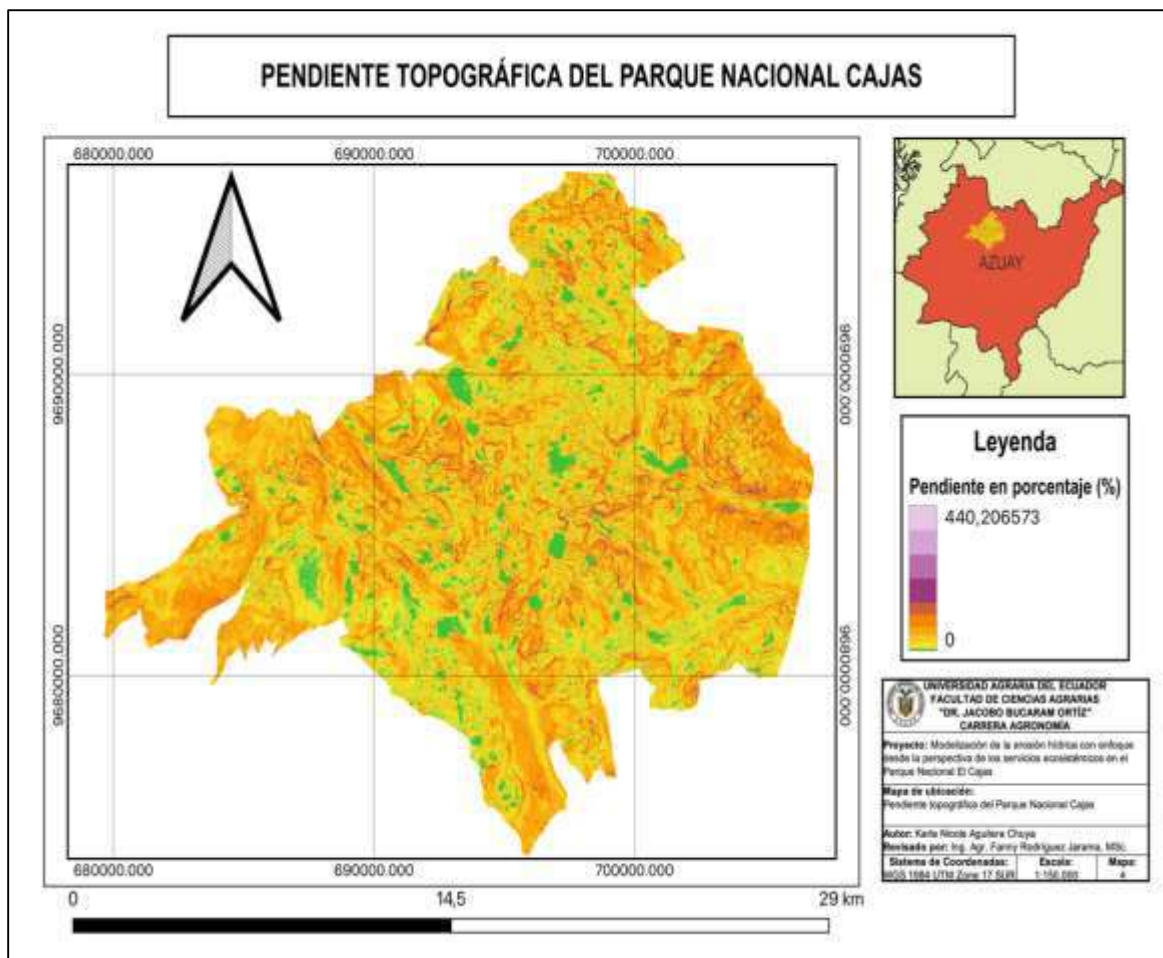
**Elaborado por:** La Autora, 2025

***4.1.7 Obtención de la pendiente topográfica***

Por medio del modelo digital de elevación (DEM) se obtuvo la variable de la pendiente topográfica del Parque Nacional Cajas, se descargó del geoportal “SIGTIERRAS”, para luego ser introducido en el software QGIS con el algoritmo de Phytón: GDAL “pendiente”, a su vez, se escogió la opción de “pendiente expresada como porcentaje (en lugar de grados)” que resultó en valores que van de 0 hasta 440.20%, lo cual representa una inclinación abrupta debido a que el área de estudio se encuentra en la cadena montañosa de los Andes, como se observa en la Figura 3.

Figura 3.

**Mapa de pendiente expresada en porcentaje del Parque Nacional Cajas.**



**Elaborado por:** La Autora, 2025

En el análisis estadístico de la variable pendiente se identificó diferentes clases según su rango y características. La Tabla 15 proporciona la clasificación estadística y las categorías etiquetadas, la clase “plano” abarca un 0.46%, 138.20 has del área total, representa pendientes muy bajas o con poca inclinación. La clase “suave” comprende el 6.57% de 1875.84 has, lo que refleja áreas con pendientes un tanto inclinadas. En la clase “moderada” que abarca el 10.85% de 3097.23 has señala que existen zonas con pendientes más pronunciadas pero aún manejables. La clase “fuerte” con 8.06% de 2300.69 has, lo que pone en evidencia pendientes significativas. La clase “muy fuerte” cubre el 38.9% del área total, siendo estas áreas de pendientes muy pronunciadas, con grados de inclinación  $> 45^\circ$ . Por último, la clase “abrupta” abarca un 33.02%, lo que enfatiza que las zonas más inclinadas del parque se encuentran en esta categoría y a su vez representan que la erosión es superior por la cantidad de lluvia que fluye por escorrentía.

Tabla 15.

**Clasificación y rango de valores de la pendiente topográfica.**

| Clasificación | Mínimo | Máximo | Rango  | Media | STD   | Área (Ha) | Área (%) |
|---------------|--------|--------|--------|-------|-------|-----------|----------|
| 1             | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     | 138.80    | 0        |
| 2             | 0.0040 | 4.99   | 4.99   | 2.14  | 1.67  | 1875.84   | 6.57     |
| 3             | 5.00   | 11.99  | 6.99   | 8.68  | 2.00  | 3097.23   | 10.85    |
| 4             | 12.00  | 25     | 12.99  | 18.80 | 3.71  | 2300.69   | 8.06     |
| 5             | 25.00  | 49.99  | 24.99  | 37.28 | 7.19  | 645.72    | 2.26     |
| 6             | 50.00  | 70     | 19.99  | 59.47 | 25.67 | 11103.55  | 38.9     |
| 7             | 70.00  | 440.20 | 370.20 | 73.31 | 31.31 | 9427.07   | 33.02    |

Elaborado por: La Autora, 2025

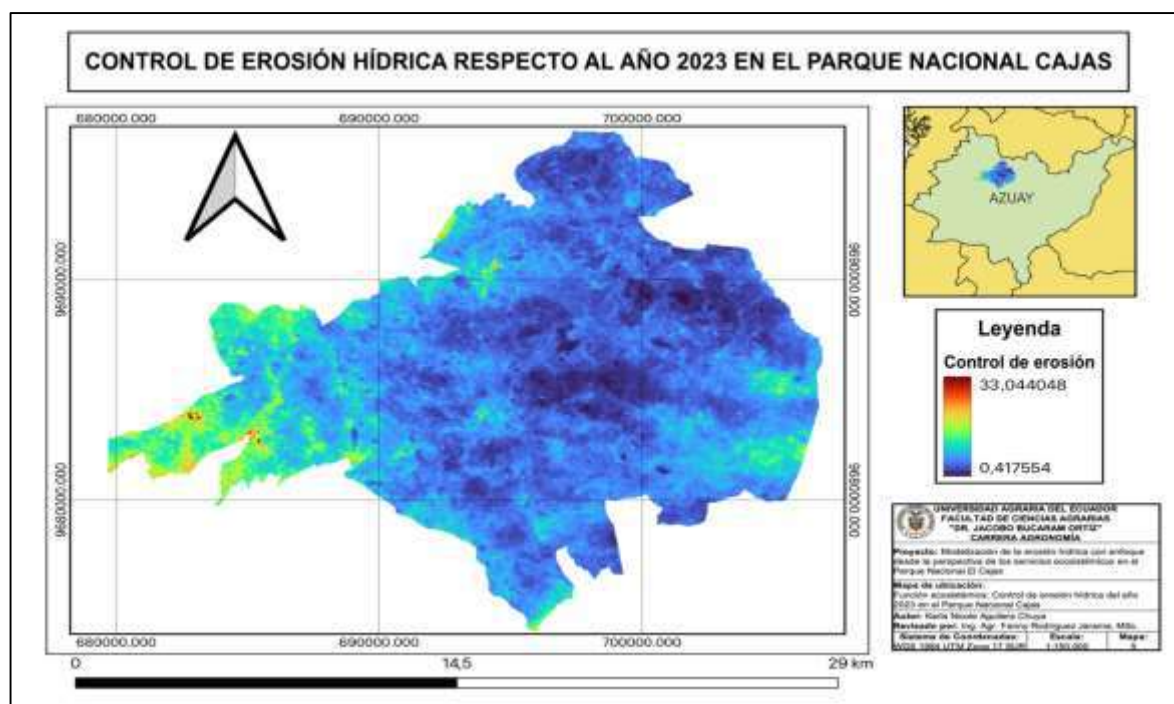
## 4.2 Uso del modelo Ecoser control de erosión hídrica en el Parque Nacional Cajas

### 4.2.1 Evaluación del control de erosión hídrica del año 2023

La Figura 4 muestra los rangos de los índices del modelo ecoser control de erosión hídrica de toda el área del Parque Nacional Cajas con respecto al año 2023. La ecuación EC se realizó por medio de la herramienta "Calculadora ráster" en QGIS.

Figura 4.

**Mapa de la función ecosistémica control de erosión hídrica año 2023 en el Parque Nacional Cajas.**



Elaborado por: La Autora, 2025



La ecuación de control de erosión hídrica se evaluó dando el uso del modelo de estimación relativa de servicios ecosistémicos propuesto por Carreño et al. (2012) y Viglizzo y Frank (2006). Este índice añade la biomasa (NDVI), como es el caso de la cobertura vegetal, esta variable fue reescalada (0 – 100) con valores de 1.15 – 65.26, al igual que un factor físico como la pendiente reescalada (0 – 1) con valores entre 0 y 0.65; estas dos variables tienen más peso dentro de la evaluación de esta función ecosistémica, este análisis permite determinar la capacidad que tiene el Parque Nacional Cajas para mitigar la pérdida de suelo ocasionada por el agua, todo esto, en relación con la cobertura vegetal, su estabilidad temporal y la topografía del área.

El NDVI alcanzó una media de 0.05, mínimo entre 0.00010, un máximo de 0.33 y desviación estándar de 0.02. La variación del NDVI (CvNDVI) se situó en un valor de 0.545216705, lo que indica la variabilidad aproximada dentro de los valores del NDVI.

El análisis estadístico detallado en la Tabla 16 refleja que la mayor parte del área presenta valores correspondientes a un control de erosión “bajo”, donde el 99.57% del área (28421.4 has) pertenecen a esta categoría, con un rango de valores entre 0.02 y 19.97. Esto evidencia áreas con poca cubierta vegetal, siendo insuficientes para garantizar un control efectivo en la mayor parte del área; alta variabilidad en el NDVI y pendientes fuertes, lo que sugiere una capacidad limitada para prevenir la erosión, aunque no representa una condición crítica. La categoría “muy bajo” ocupa solo el 0.0003% (0.08 has), al igual que las categorías “moderada” con 0.42% (119.98 has) y “alto” con 0.0006% (0.17 has). Las áreas con la categoría “muy alto” son marginales, lo que refleja la necesidad inmediata de mejorar o preservar estas zonas.

**Tabla 16.**

***Clasificación y rango de valores del control de erosión hídrica año 2023.***

| Clasificación | Mínimo | Máximo | Rango | Media | STD  | Área (Ha) | Área (%) |
|---------------|--------|--------|-------|-------|------|-----------|----------|
| 1             | 0      | 0      | 0     | 0     | 0    | 0.08      | 0.0003   |
| 2             | 0.0208 | 19.97  | 19.95 | 6.28  | 3.32 | 28421.4   | 99.57    |
| 3             | 0.0205 | 29.27  | 39.72 | 22.67 | 2.94 | 119.98    | 0.42     |
| 4             | 40.47  | 44.41  | 3.93  | 42.44 | 1.96 | 0.17      | 0.0006   |

**Elaborado por:** La Autora, 2025

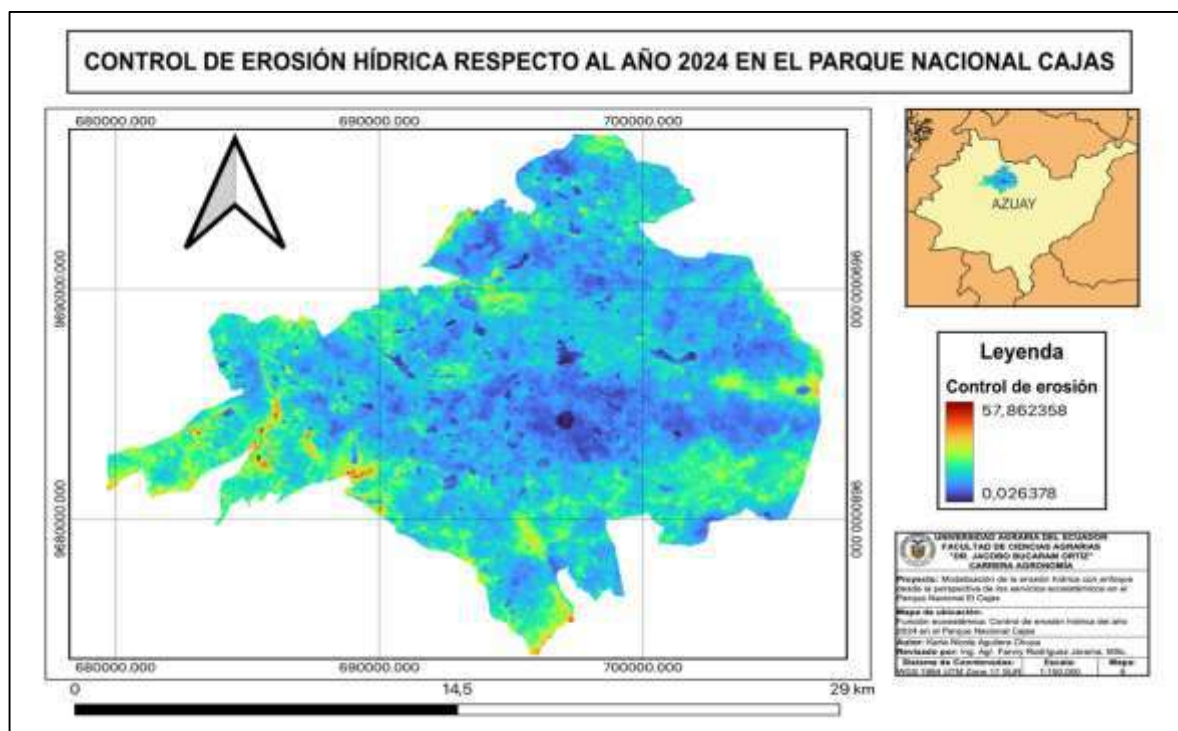
Este análisis evidencia que, si bien el Parque Nacional Cajas mantiene pocas áreas con categorías de control de erosión “moderado a alto”, la predominancia de valores bajos sugiere vulnerabilidad ante la erosividad, sobre todo en áreas con pendientes pronunciadas y alta variabilidad del NDVI. La conservación y restauración de la cobertura vegetal en estas zonas se presenta como una prioridad para mejorar la capacidad de este ecosistema de controlar la erosión y garantizar su estabilidad a largo plazo.

#### 4.2.2 Evaluación del control de erosión hídrica del año 2024

La Figura 5 muestra los rangos de los índices del modelo según Ecoser control de erosión hídrica en el Parque Nacional Cajas con respecto al año 2024. Al igual que en el año 2023, se estimaron los valores respectivos con la herramienta “calculadora ráster” en QGIS.

**Figura 5.**

**Mapa de la función ecosistémica control de erosión hídrica año 2024 en el Parque Nacional Cajas.**



**Elaborado por:** La Autora, 2025

Por medio de la ecuación se evaluó el NDVI, la variación del NDVI y la pendiente, teniendo en cuenta que el NDVI fue reescalado (0 – 100) dando valores de 0.038 – 85.62, al igual que la pendiente reescalada (0 – 1) con valores de 0 y 0.65 (se utilizó la misma pendiente que en el año 2023).

El NDVI alcanzó una media de 0.08, un valor mínimo de 0.010, máximo de 0.29 y desviación estándar de 0.02. El coeficiente de variación se estimó en 0.321789657, y esto indica que los datos poseen una variabilidad relativa en relación con su media.

El análisis del control de erosión en el área de interés para el año 2024 mantiene un bajo control para mitigar la erosión del suelo. El 79.18% del área, es decir, las 22597.74 has, se encuentran en la categoría de control “bajo” lo que implica suelos descubiertos, poca estabilidad y pendientes fuertes, convirtiéndolos muy vulnerables ante este fenómeno natural. Un 20.8% (5939.91 has) del área presenta un control “moderado”, apenas el 0.28% (79.60 has) se categoriza como control “alto”, mientras que la categoría con “muy alto” control son casi nulas porque ocupan solo el 0.0049% (1.39 has), esto manifiesta la urgente necesidad de implementar estrategias de conservación, como la reforestación y el manejo adecuado del suelo, para mejorar la estabilidad de este ecosistema y prevenir la degradación que el mismo ofrece.

**Tabla 17.**

***Clasificación y rango de valores del control de erosión hídrica año 2024.***

| <b>Clasificación</b> | <b>Mínimo</b> | <b>Máximo</b> | <b>Rango</b> | <b>Media</b> | <b>STD</b> | <b>Área (Ha)</b> | <b>Área (%)</b> |
|----------------------|---------------|---------------|--------------|--------------|------------|------------------|-----------------|
| 1                    | 0             | 0             | 0            | 0            | 0          | 0.08             | 0.0003          |
| 2                    | 0.0263        | 19.99         | 19.97        | 13.53        | 3.75       | 22597.74         | 79.18           |
| 3                    | 20.00         | 39.99         | 19.99        | 24.27        | 3.39       | 5939.91          | 20.8            |
| 4                    | 40.00         | 59.71         | 19.71        | 44.72        | 3.99       | 79.60            | 0.28            |
| 5                    | 60.00         | 66.92         | 6.91         | 62.31        | 1.81       | 1.39             | 0.0049          |

**Elaborado por:** La Autora, 2025

***4.2.3 Comparación del control de erosión hídrica del año 2023 y 2024 en el Parque Nacional Cajas***

El control de erosión hídrica que se evaluó en el Parque Nacional Cajas con el modelo Ecoser propuesto por Carreño et al. (2012) y Viglizzo et al. (2011) indican la vulnerabilidad que posee este ecosistema ante la erosividad. Es por ello que el año 2023 en comparación al 2024 muestran un ligero aumento en la media del NDVI (de 0.05 – 0.08), aunque con una reducción en su valor máximo, lo que sugiere una cobertura vegetal menos densa en ciertas zonas. La capacidad de

control de erosión en 2024 sigue siendo baja de un 99.57% (28421.4 hectáreas) a un 79.18% en las 22597.74 hectáreas.

Las categorías de control moderado, alto y muy alto son mínimas o casi inexistentes, lo que pone en evidencia la alta vulnerabilidad de este ecosistema ante la erodabilidad.

Además, el coeficiente estabilidad del NDVI en el año 2023 (CvNDVI de 0.54) refleja inestabilidad en la cobertura vegetal, esto se puede relacionar con los incendios forestales provocados en el parque a finales del 2024. En su mayoría, el análisis con respecto al año 2024 indica que, a pesar de algunos cambios en los valores del NDVI, la erosión sigue siendo un problema relevante en esta zona, es por ello que, se destaca la necesidad inmediata de estrategias de conservación y restauración del lugar, así como la importancia de tomar acciones de mejoras y manejo ambiental para garantizar su sostenibilidad a largo plazo.

### **4.3 Plan de gestión del suelo de las áreas vulnerables para mitigar su degradación**

#### **4.3.1 Diagnóstico de los recursos del Parque Nacional Cajas**

El Parque Nacional Cajas alberga ecosistemas sensibles, como páramos, matorrales, cuerpos de agua, humedales herbáceos, ecosistemas marino – costeros que destacan por su alta diversidad biológica y su relación con la provisión de servicios ecosistémicos esenciales. Desempeña un papel crucial al ofrecer variedad de bienes y servicios ambientales, siendo una fuente estratégica del recurso hídrico, con notable biodiversidad de especies endémicas y se caracteriza por la ausencia de asentamientos humanos en su interior.

Este valioso patrimonio hídrico se manifiesta en la presencia de más de 232 lagunas, mismas que constituyen las nacientes de los ríos Yanuncay, Tomebamba, Mazán y Migüir, mismos que desempeñan un rol importante en el suministro de agua potable para la ciudad de Cuenca y sus zonas aledañas, al mismo tiempo como contribuyentes del Complejo Hidroeléctrico Paute. El Parque es un importante sistema hídrico que cuenta con 235 lagunas, las cuales alimentan las cuencas de los ríos Cañar, Balao y Paute. La cuenca del río Cañar incluye las subcuencas de los ríos Paute y Migüir, mientras que la del río Balao está formada por los ríos Angas, Jerez y Canoas. La cuenca del río Paute abarca las subcuencas de los ríos Tomebamba (44 lagunas), Taitachugo (29 lagunas), Mazán (17 lagunas).

Es por ello que, la identificación de los elementos de conservación se llevó a cabo mediante un enfoque integral y ecosistémico, que incorpora la conservación, el uso sostenible de los recursos genéticos y la distribución equitativa de los beneficios derivados de su aprovechamiento. También, se destaca la urgencia de implementar acciones en la zona de influencia del área protegida como estrategia para preservar y mejorar el estado de conservación de los ríos con un enfoque integral en la gestión de la cuenca hídrica. Los principales impactos a abordar están relacionados con el cambio del uso de suelo. En la Tabla 18 y 19 se determinan algunos de los aspectos a evaluar en esta fase, entre ellos se encuentran los elementos biofísicos y socioeconómicos del parque.

**Tabla 18.**

***Elementos biofísicos dentro del Parque Nacional Cajas.***

| <b>Elementos</b>          | <b>Descripción</b>                                                                                                                                                                                                                    |
|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Hidrografía               | En el Parque Nacional Cajas se sitúan las cuencas de los ríos Balao, Cañar y Paute, sus respectivas subcuencas: ríos Balao, Patul, Tomebamba y Yanuncay; y microcuencas de importancia como: río Mazán, Llaviuco, Soldados y Quinuas. |
| Clima                     | Zona de páramo, experimenta grandes variaciones térmicas, con fríos intensos por la noche y temperaturas superior a 25°C durante el día.                                                                                              |
| Uso y cobertura del suelo | La cobertura vegetal predominante dentro del parque son los pastizales que ocupan el 86% de la superficie y matorrales con 8%.<br>Los páramos, humedales, bosques andinos, cuerpos de agua (lagunas), zonas montañas y ecosistemas    |
| Ecosistemas estratégicos  | marino – costeros son importantes para la regulación hídrica, la biodiversidad y los servicios ecosistémicos que benefician a las comunidades aledañas.                                                                               |

**Elaborado por:** La Autora, 2025

**Tabla 19.*****Elementos socio – económicos en el Parque Nacional Cajas.***

| <b>Elementos</b>       | <b>Descripción</b>                                                                                                                                                                                                                                      |
|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Abastecimiento de agua | La existencia del sistema lacustre del área garantiza el suministro de agua a las comunidades locales, aledañas y al cantón Cuenca.                                                                                                                     |
| Turismo                | Debido a los diversos atractivos naturales, culturales, históricos y arqueológicos, servicios turísticos, vías de acceso del parque, este se ha consolidado como un referente del turismo en la región, lo cual permite generar ingresos a los locales. |
| Pesca deportiva        | La pesca es una actividad muy frecuente en el parque, misma que está condicionada con el uso de anzuelos. Sin embargo, si no se supervisa y controla esta actividad podría ocasionar un impacto ambiental en las microcuencas.                          |

---

**Elaborado por:** La Autora, 2025

***4.3.2 Análisis del estado del Parque Nacional Cajas***

Gracias al modelo del control de erosión hídrica propuesto por Ecoser, se determinó que el Parque Nacional Cajas presenta un bajo control de erosión hídrica entre el año 2023 y 2024. Aunque el NDVI media aumentó de forma leve, la reducción en su variabilidad sugiere una cobertura vegetal más homogénea y escasa. En 2023, el 99.57% del área tuvo un control “bajo”, pero en 2024 el 79.18% pasó “muy bajo”, con zonas de control “alto” de manera aparente. La combinación de pendientes pronunciadas y pérdida de cobertura ha incrementado la vulnerabilidad del suelo, este deterioro requiere acciones inmediatas como la reforestación, manejo del suelo y monitoreo constante para prevenir este fenómeno natural. La disminución de la estabilidad del ecosistema podría afectar servicios ecosistémicos como la regulación hídrica y la biodiversidad.

***4.3.3 Problemática dentro del área de investigación***

El Parque Nacional Cajas enfrenta una problemática ambiental relevante debido a que esta área posee un bajo control de erosión hídrica, lo que afecta la estabilidad del suelo, la calidad del agua, y por supuesto, su biodiversidad. La

erosión provoca la pérdida de la cobertura vegetal, degradación del suelo y sedimentación de los cuerpos de agua, como las lagunas presentes en el parque, impactan tanto al ecosistema como a las comunidades que dependen de sus recursos. Sus causas influyen factores naturales como la pendiente del terreno, lluvias, y actividades humanas como incendios forestales provocados y el turismo no planificado. Para reducir este impacto, es necesario implementar estrategias como la restauración de la vegetación, conservación de las especies endémicas tanto de flora como fauna. La participación y concientización de las comunidades y autoridades es importante para alcanzar soluciones sostenibles.

#### **4.3.4 Planificación**

Gracias a la teledetección y el mapeo en el Parque Nacional Cajas se logró determinar cuáles son las zonas con bajo control de erosión, esto propicia a poder establecer mejoras, tomar medidas al respecto y así alcanzar a que este hermoso ecosistema pueda desempeñar de forma correcta su función de proteger el suelo contra la erosión que es provocada por el agua. En la Tabla 20 ejemplifica con más detalles estos programas de manejo, su objetivo y las actividades que deberían efectuarse.

**Tabla 20.**

#### ***Programa de mejoras para la conservación del parque.***

| <b>Componente</b>                       | <b>Objetivo</b>                                                                           | <b>Actividades</b>                                                                                                                                    |
|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Protección de microcuencas              | Preservar las microcuencas para garantizar la regulación hídrica y evitar la erosión.     | Reforestación con especies nativas en áreas cercanas a cuerpos de agua.                                                                               |
| Manejo de residuos sólidos              | Reducir el impacto de los residuos en los ecosistemas y proteger la calidad del suelo.    | - Instalación de puntos de recolección de residuos.<br>- Campañas de limpieza y reciclaje en zonas de visita turística como la zona de "Tres Cruces". |
| Monitoreo                               | Seguir evaluando las dinámicas de erosión mediante el mapeo y uso de drones.              | - Monitoreo continuo del control de erosión.<br>- Estudios hidrológicos en microcuencas.                                                              |
| Conservación y preservación             | Mantener la funcionalidad sostenible del parque a largo plazo.                            | Regulación del turismo en las áreas con bajo control de erosión.                                                                                      |
| Compensación de servicios ecosistémicos | Fomentar la compensación por los beneficios ecosistémicos del parque.                     | - Implementación de pagos por servicios ecosistémicos.<br>- Alianzas con comunidades locales para conservación.                                       |
| Educación ambiental                     | Sensibilizar a las comunidades y visitantes sobre la importancia de controlar la erosión. | Capacitaciones, talleres comunitarios, materiales educativos distribuidos entre turistas.                                                             |

**Elaborado por:** La Autora, 2025

## 5. DISCUSIÓN

Gracias a las imágenes satelitales se obtiene información precisa sobre los datos de NDVI, cobertura y pendiente. Los satélites Landsat 8 y 9 proporcionan estos datos, que son procesados mediante herramientas de análisis geoespacial como Google Earth Engine, geoportales nacionales como Sigtierras y MAG para obtener el modelo digital de elevación, los cuales son analizados con software SIG como QGIS, dando paso al monitoreo y mapeo correcto de la ecuación control de erosión hídrica de manera efectiva. Como menciona Álvarez (2019), las imágenes satelitales revolucionan el mapeo de los suelos mediante los Sistemas de Información Geográfica (SIG), siendo esenciales para analizar fenómenos como la erosión y gestionar de manera eficiente los recursos naturales ante desastres naturales o provocados por el ser humano.

Los resultados evidencian que el Parque Nacional Cajas tiene un bajo control de erosión. Esto se determina gracias a análisis de datos geoespaciales obtenidos mediante técnicas de teledetección, que incluyen imágenes de los satelitales Landsat 8 y 9 descargadas desde Google Earth Engine, lo que concuerda con Zumaeta (2021) donde señala que la teledetección permite realizar análisis multitemporales y predictivos sobre cambios en el uso del suelo y la pérdida de cobertura vegetal.

El Parque Nacional Cajas ubicado en la Cordillera de los Andes, presenta una altitud que varía entre 3138.81 y 4451.57 msnm, según el modelo digital de elevación. La topografía de la zona se caracteriza por presentar pendientes abruptas que alcanzan valores de hasta 440.20% ( $> 45^\circ$ ) siendo un factor que influye de forma directa en este fenómeno natural. Esto es coherente con el estudio realizado por Vanacker et al. (2020) donde hace referencia a que las zonas montañosas son muy susceptibles ante las elevadas tasas de erosión.

El modelo Ecoser se utiliza para evaluar el control de erosión hídrica, considera variables como NDVI (biomasa), coeficiente de estabilidad (variación del NDVI) y la pendiente. La pendiente resulta ser el factor más relevante, debido a que influye de manera directa en la retención de biomasa. De acuerdo a Carreño et al. (2012), en su investigación evidencia que gracias al modelo biofísico para estimar la oferta de servicios ecosistémicos y valoración económica de la producción agrícola, facilita la comprensión de cambios en el uso de suelo, uso de información sobre la biomasa, cobertura de agua, pendiente, entre otros factores.



Ecoser plantea modelos alternativos para evaluar los servicios ecosistémicos, enfocándose en la estimación del control de erosión hídrica. Para ello se consideran datos como el NDVI, su variación y pendiente. En 2023, el NDVI registra una media de 0.05 con un coeficiente de variación de 0.54, lo que refleja una significativa variabilidad en la cobertura. En 2024, la media del NDVI muestra un ligero aumento y alcanza el valor de 0.08, lo que indica una reducción en la densidad de la vegetación en ciertas zonas. De igual manera Vatandaşlar y Yavuz (2023) desarrollan modelos e indicadores para evaluar la erosión sin necesidad de emplear la metodología RUSLE, lo que facilita su aplicación en distintos escenarios ambientales.

El análisis comparativo entre 2023 y 2024 muestra la capacidad de control de erosión en el Parque Nacional Cajas sigue siendo “baja”. Esta situación se debe a la combinación de cambios en la cobertura y la fuerte pendiente del terreno. Por el contrario, Portalanza et al. (2024) determina que el Sistema de Humedales Abras de Mantequilla ofrece una “alta” capacidad de almacenamiento de carbono, retención de nutrientes y control de erosión hídrica, lo que subraya la importancia de las características del ecosistema en la mitigación de la erosión.

En 2023, el 99.57% del área del Parque Nacional Cajas (28421.4 hectáreas) presentó un control de erosión “bajo”, con valores que oscilan entre 0.02 y 19.97. Esto indica una escasa cubierta vegetal, alta variabilidad del NDVI y pendientes pronunciadas, factores que limitan la capacidad del ecosistema para prevenir la erosión sin llegar a una situación crítica. En 2024, la capacidad del parque para mitigar la erosión se redujo aún más, con el 79.18% del área (22597.74 hectáreas) clasificada como control “bajo”. Solo el 20.8% del área muestra un control “muy bajo”, y apenas el 0.28% se clasifica como “moderado”, las áreas con control “alto” o “muy alto” son nulas (0.0049%), lo que pone en evidencia la urgente necesidad de implementar estrategias de conservación como la reforestación y el manejo adecuado del suelo para mejorar la estabilidad del ecosistema y prevenir su degradación. Según Riscal (2021) indica que los ecosistemas como en región La Aucaraía se concentra el control de erosión debido a pendientes suaves y alta vegetación, mientras que en la Cordillera de los Andes y Nahuelbuta es menor por pendientes pronunciadas y menor cobertura vegetal.

El análisis del Parque Nacional Cajas permite proponer estrategias para su conservación, considerando su reconocimiento como humedal de importancia

RAMSAR. Gracias al monitoreo y mapeo con técnicas de teledetección, se pueden implementar programas de manejo de suelos, microcuencas existentes en el lugar, el manejo de residuos sólidos, el monitoreo, conservación y preservación, servicios ecosistémicos y educación ambiental y que este entorno pueda desempeñar de forma correcta su función de proteger el suelo contra la erosión. De igual manera como lo mencionan Rendon et al. (2022) en su estudio enfocado en el Mapeo y Evaluación de los Ecosistemas y sus Servicios (MAES) en la Unión Europea donde los resultados muestran una alta capacidad de los agroecosistemas para mitigar la erosión, siendo influida por diversos indicadores ambientales y de gestión. Se enfatiza la importancia de prácticas de manejo conservacionista adaptadas al entorno local y regional para preservar la calidad del suelo y mejorar la salud de los agroecosistemas.

Se acepta la hipótesis planteada en la investigación dado que se determina por medio de imágenes satelitales que el control de erosión hídrica en el año 2023 corresponde al 99.57% del área, al igual que en el año 2024 con 79.18%, por ende el control es muy bajo y se considera que es un entorno vulnerable a este fenómeno.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 Conclusiones

El Parque Nacional Cajas es un ecosistema vulnerable ante el fenómeno de erosión hídrica, con un 99.57% lo que corresponde a 28421.4 hectáreas clasificadas en la categoría de control de erosión “bajo” en el año 2023. En el año 2024 el control se mantuvo en esta categoría, lo que abarca el 79.18% del área, es decir, las 22597.74 hectáreas. Esta situación ocurre debido a la presencia de pendientes pronunciadas y suelos desnudos con escasa estabilidad.

El análisis basado en imágenes satelitales obtenidas de Google Earth Engine, junto con datos de cobertura y uso de suelo (LULC), el modelo digital de elevación (DEM) y la pendiente topográfica, permite evaluar y mapear, mediante el modelo Ecoser, el bajo control de erosión hídrica que caracteriza a este ecosistema.

Las zonas con mayor superficie dentro del Parque Nacional Cajas presentan un “bajo” control de erosión hídrica. En el año 2023, el coeficiente de estabilidad del NDVI se sitúa en 0.545216705, mientras que en 2024 disminuye a 0.321789657, lo que refleja una notable variabilidad en la cobertura vegetal del parque. Además, al tratarse de una zona montañosa, predominan pendientes muy fuertes, cubriendo el 38.9% del territorio. Esto evidencia que las áreas más inclinadas del parque presentan mayor erosión debido a la escorrentía generada por la precipitación.

El Parque Nacional Cajas muestra un bajo control de erosión, como se confirma en esta investigación. Sin embargo, cuenta con un 84.08% de su superficie cubierta por pastizales, los cuales pueden desaparecer de forma fácil debido a incendios o al arrastre por aluviones, aumentando su vulnerabilidad a la erosión por escorrentía. Factores biofísicos como estos amenazan su biodiversidad y los servicios ecosistémicos que brinda. Por ello, se proponen programas de gestión para mitigar estos impactos, incluyendo reforestación, manejo de residuos, monitoreo y mapeo, regulación del turismo y educación ambiental, con el objetivo de garantizar su sostenibilidad a largo plazo. La participación comunitaria y la compensación por servicios ecosistémicos son claves para preservar este ecosistema y los múltiples beneficios que ofrece.

## **6.2 Recomendaciones**

Se recomienda la selección de modelos adecuados para la estimación de los servicios ecosistémicos y así priorizar el uso de los datos geoespaciales con alta resolución. Incluir un análisis de escenarios que evalúe como el cambio climático, las actividades humanas o las políticas de conservación podrían afectar el control de erosión hídrica. Esto permitirá desarrollar propuestas de manejo adaptativo y garantizar que los servicios ecosistémicos de regulación sean sostenibles a largo plazo.

Se recomienda utilizar imágenes satelitales con mayor resolución y que tengan poco porcentaje de nubosidad para así obtener un análisis más real y próximo en las investigaciones y así permitir el alcance de las áreas analizadas.

Se sugiere un sistema de monitoreo continuo y herramientas de teledetección en conjunto a los Sistemas de Información Geográfica que permitan actualizar de forma periódica el análisis de la cobertura vegetal y demás factores que puedan mitigar la erosividad en los ecosistemas, lo que facilitaría la identificación temprana de áreas vulnerables.

Se propone emplear los programas de mejoras propuestos en la presente investigación para los ecosistemas vulnerables a eventos naturales como la erosión que amenazan su biodiversidad, los servicios ecosistémicos que brindan, con el propósito de un plan de gestión para la conservación de estos espacios y así garantizar su sostenibilidad.

## BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo, I., Sánchez, A., y Mendoza, B. (2020). Evaluation of the level of soil degradation in two productive systems in the Quibor depression. I. Multivariate analysis. *Bioagro*, 33(1), 59–66. <https://revistas.uclave.org/>
- Alvarado, V. (2021). Factores que inciden en la erosión hídrica. *Ciencia y Práctica*, 1(2), 57–68. <https://doi.org/10.52109/cyp2021217>
- Álvarez, L. (2019). Indicadores para medir la erosión de los suelos por acción de la lluvia: Una revisión con énfasis en la estabilización masiva y control de las tasas de erosión. *Revista Investigación Agraria*, 1, 67–75. <https://doi.org/10.47840/ReInA2019v1n1p.76-87>
- Arias, D., Jiménez, P., Oquendo, J., y Cabrera, S. (2023). *Reporte de salud ambiental de la cuenca hidrográfica del río Ambi - Ecuador*. Editorial UTN. <https://www.researchgate.net/>
- Asamblea Nacional del Ecuador. (2014, 6 de agosto). *Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Uso y Aprovechamiento del Agua*. Registro Oficial Del Ecuador, Segundo Suplemento N° 305. <https://www.lexis.com.ec/>
- Asamblea Nacional del Ecuador. (2017, 6 de abril). *Código Orgánico del Ambiente*. Registro Oficial Del Ecuador, Suplemento N° 983. <https://www.ambiente.gob.ec/>
- Barral, M. (2017). *Tutorial for mapping ecosystem functions and ecosystem services*. <https://www.researchgate.net/>
- Carreño, L., Frank, F., y Viglizzo, E. (2012). Tradeoffs between economic and ecosystem services in Argentina during 50 years of land-use change. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 154, 68–77. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.05.019>
- Congressional Research Service. (2021). Landsat 9 and the Future of the Sustainable Land Imaging Program. In *Congressional Research Service*. <https://crsreports.congress.gov/>
- Cuevas, F. (2021). *Análisis de los efectos del cambio de cobertura de suelo en los procesos de erosión hídrica en la cuenca del estero Coyanco (1986-2020). Quillón-Chile*. [Tesis de Posgrado, Universidad de Concepción]. Repositorio institucional. <http://repositorio.udec.cl/>

- EOS Data Analytics. (2024). *Landsat 8 Satellite Images*. Landsat 8 Satellite Overview: Sensors, Imagery & Bands. <https://eos.com/>
- Fariz, T., Suhardono, S., Sultan, H., Rahmawati, D., y Arifah, E. (2022). Land Cover Mapping in Lake Rawa Pening Using Landsat 9 Imagery and Google Earth Engine. *Journal of Environmental and Science Education*, 2(1), 1–6. <https://doi.org/10.15294/jese.v2i1.55851>
- Google Earth Engine. (2021, 1 de enero). *ESA WorldCover 10m v100*. <https://earthengine.google.com/>
- Ibañez, S., Gisbert, J., y Moreno, H. (2011). La pendiente del terreno. In *La pendiente del terreno*. <http://hdl.handle.net/10251/10776>
- Iñiguez, X., y Aguilar, J. (2022). Ciencia ciudadana e interacciones entre aves nectarívoras y plantas de páramo en el Parque Nacional Cajas. *ACI Avances En Ciencias e Ingenierías*, 14(1), 1–9. <https://doi.org/10.18272/aci.v14i1.2318>
- Laterra, P., Jobbágy, E., y Paruelo, J. (2011). *Valoración de servicios ecosistémicos. Conceptos, herramientas y aplicaciones para el ordenamiento territorial* (Ediciones INTA, Ed.). <https://www.researchgate.net/>
- Lucena, P., Fernandes, J., Gómes, J., y Da Silva, D. (2023). Aplicação da USLE nos Serviços Ecosistêmicos de Controle de Erosão em Área Suscetível à Desertificação, NE-Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 16(2), 1088–1103. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.2.p1088-1103>
- Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca [MAGAP] (2012). *Zonificación agroecológica del cultivo de banano (Musa sapientum) en el Ecuador a escala 1:25.000 y 1:250.000*. <https://sipa.agricultura.gob.ec/>
- Montico, S., Di Leo, N., Bonel, B., y Berardi, J. (2021). Servicios ecosistémicos provistos por los suelos en una cuenca de Santa Fe, Argentina. *Cuadernos Del CURIHAM*, 27, 1–8. <https://doi.org/10.35305/curiham.v27i.166>
- Moreira, A., Mirandola, P., Pinto, A., Salinas, E., y de Oliveira, I. (2020). Manejo integrado de cuencas hidrográficas: posibilidades y avances en los análisis de uso y cobertura de la tierra. *Cuaderno de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 29(1), 69–85. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v29n1.76232>
- Mugmal, L., Revelo, S., Congo, G., Valencia, X., Trejo, J., y Benalcázar, S. (2023). Servicios Ecosistémicos del bosque protector “Loma de Guayabillas”, del cantón Ibarra. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(3), 6247–6265. [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v7i3.6626](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i3.6626)

- Muñoz, F., Rengifo, I., y Toro, O. (2022). Modelo USLE para estimar la erosión hídrica en siete municipios de la zona andina colombiana. *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 20(2), 1–13.  
<https://doi.org/10.18684/rbsaa.v20.n2.2022.1738>
- Núñez, J., Pizarro, S., Gutiérrez, M., y Ñaupari, J. (2021). Dinámica espacio temporal de la biomasa aérea en pastizales altoandinos basado en NDVI-MODIS validado por espectrometría in situ. *Revista de Investigaciones Veterinarias Del Perú*, 32(3), 1–14. <https://doi.org/10.15381/rivep.v32i3.20392>
- Pachés, M. (2020). *Degradación de suelos*. Universitat Politècnica de València. <http://hdl.handle.net/10251/142676>
- Petersson, M., Marrero, M., y Monzón, Y. (2022). La valoración económica de los servicios ecosistémicos culturales. Caso Bahía de Matanzas. *Revista Universidad y Sociedad*, 14(1), 87–96.
- Pinos, D., Morales, O., y Durán, M. (2021). Suelos de páramo: Análisis de percepciones de los servicios ecosistémicos y valoración económica del contenido de carbono en la sierra sureste del Ecuador. *Revista de Ciencias Ambientales*, 55(2), 157–179. <https://doi.org/10.15359/rca.55-2.8>
- Portalanza, D., Barral, M., Villa, G., Ferreira, S., Herrera, P., Durigon, A., y Ferraz, S. (2019). Mapping ecosystem services in a rural landscape dominated by cacao crop: A case study for Los Rios province, Ecuador. *Ecological Indicators*, 107, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105593>
- Portalanza, D., Torres, M., Arias, M., Piza, C., Villa, G., Garcés, F., Álava, E., Durigon, A., y Espinel, R. (2024). Ecosystem services valuation in the Abras de Mantequilla wetland system: A comprehensive analysis. *Ecological Indicators*, 158, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111405>
- Radicelli, C., Pomboza, M., Villacrés, P., y Boderó, E. (2019). Sistemas de Información Geográfica y su aplicación en las Ciencias Sociales: una revisión bibliográfica. *Chakiñan, Revista de Ciencias Sociales y Humanidades*, 8, 93–104. <https://doi.org/10.37135/chk.002.08.02>
- Ramos, B. (2022, 22 de febrero). *Cómo obtener las nuevas imágenes de Landsat 9*. Landsat Missions. <https://www.cursosteledeteccion.com/>
- Rendon, P., Steinhoff, B., y Burkhard, B. (2022). Linking ecosystem condition and ecosystem services: A methodological approach applied to European

- agroecosystems. *Ecosystem Services*, 53.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2021.101387>
- Riscal, M. (2021, 8 de diciembre). *Planificación ecológica de la infraestructura ecológica de la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos y programa regional de prioridades de restauración ecológica en el contexto de los incendios de la temporada 2016 - 2017: Aplicación en región de La Araucanía*.  
<https://es.scribd.com/>
- Sanunga, L. (2021). *Ajuste de modelos a gran escala de la precipitación hídrica en la provincia de Chimborazo utilizando datos ráster y vectoriales* [Tesis de Pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. Repositorio institucional. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/>
- Somoza, A., y Vazquez, P. (2023). Erosión hídrica e intensificación agrícola considerando unidades ambientales. El caso de Tandil, Región Pampeana Argentina. *Cuadernos Geográficos*, 62(1), 273–299.  
<https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v62i1.24561>
- Toulkeridis, T., Echeagaray Aveiga, R., y Martínez Maldonado, K. (2021). Shock metamorphism in volcanic rock due to the impact of the miguir-cajas meteorite in 1995 and its importance for Ecuador. *Geojournal of Tourism and Geosites* , 35(2), 315–321. <https://doi.org/10.30892/GTG.35208-654>
- Ulloa, C., Álvarez, S., Jorgensen, P., y Minga, D. (2017). *Guía de 100 plantas silvestres del páramo del Parque Nacional Cajas*. <https://www.mobot.org/>
- Uribe, E., Escamilla, J., y Cruz, E. (2018). Evaluación del Modelo de Elevación Digital oficial mexicano (Continuo De Elevación Mexicano, CEM 3.0) de INEGI. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 9(6), 153–172. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-06-07>
- Vanacker, V., Guns, M., Clapuyt, F., Balthazar, V., Tenorio, G., y Molina, A. (2020). Spatio-temporal patterns of landslides and erosion in tropical andean catchments. *Pirineos*, 175, e051. <https://doi.org/10.3989/pirineos.2020.175001>
- Vanacker, V., Molina, A., Rosas, M. A., Bonnesoeur, V., Román-Dañobeytia, F., Ochoa-Tocachi, B. F., y Buytaert, W. (2022). The effect of natural infrastructure on water erosion mitigation in the Andes. *SOIL*, 8(1), 133–147. <https://doi.org/10.5194/soil-8-133-2022>
- Vatandaşlar, C., y Yavuz, M. (2023). Useful indicators and models for assessing erosion control ecosystem service in a semi-arid forest landscape.

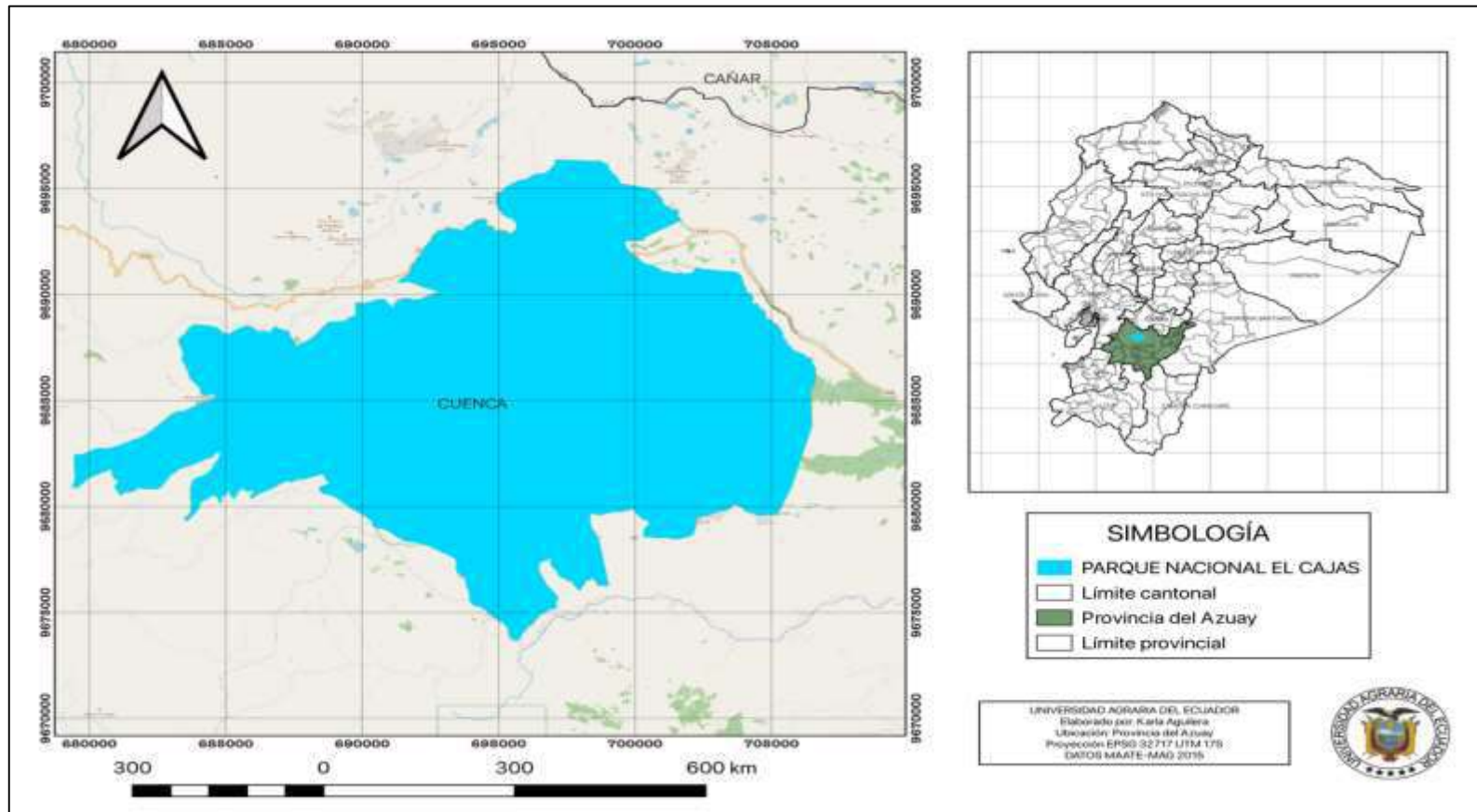


- Environmental Monitoring and Assessment*, 195(1), 208. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10814-1>
- Viglizzo, E., Carreño, L., Volante, J., y Mosciaro, J. (2011). *Valuación de los Bienes y Servicios Ecosistémicos: Verdad objetiva o cuento de la buena pipa? en: Valoración de Servicios Ecosistémicos: Conceptos, Herramientas Y Aplicaciones Para El Ordenamiento Territorial.*
- Viglizzo, E., y Frank, F. (2006). Land-use options for Del Plata Basin in South America: Tradeoffs analysis based on ecosystem service provision. *Ecological Economics*, 57(1). <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.03.025>
- Villareyna, R., Avelino, J., y Cerda, R. (2020). Ecosystem-based adaptation: effect of shade trees on ecosystem services in coffee plantations. *Agronomía Mesoamericana*, 31(2), 499–516. <https://doi.org/10.15517/am.v31i2.37591>
- Zumaeta, D. (2021). Análisis multitemporal y predictivo del cambio de uso del suelo y pérdida de cobertura vegetal. *Revista Científica UNTRM: Ciencias Naturales e Ingeniería*, 2(3), 81–89. <https://doi.org/10.25127/ucni.v2i3.607>

## ANEXOS

Figura 6.

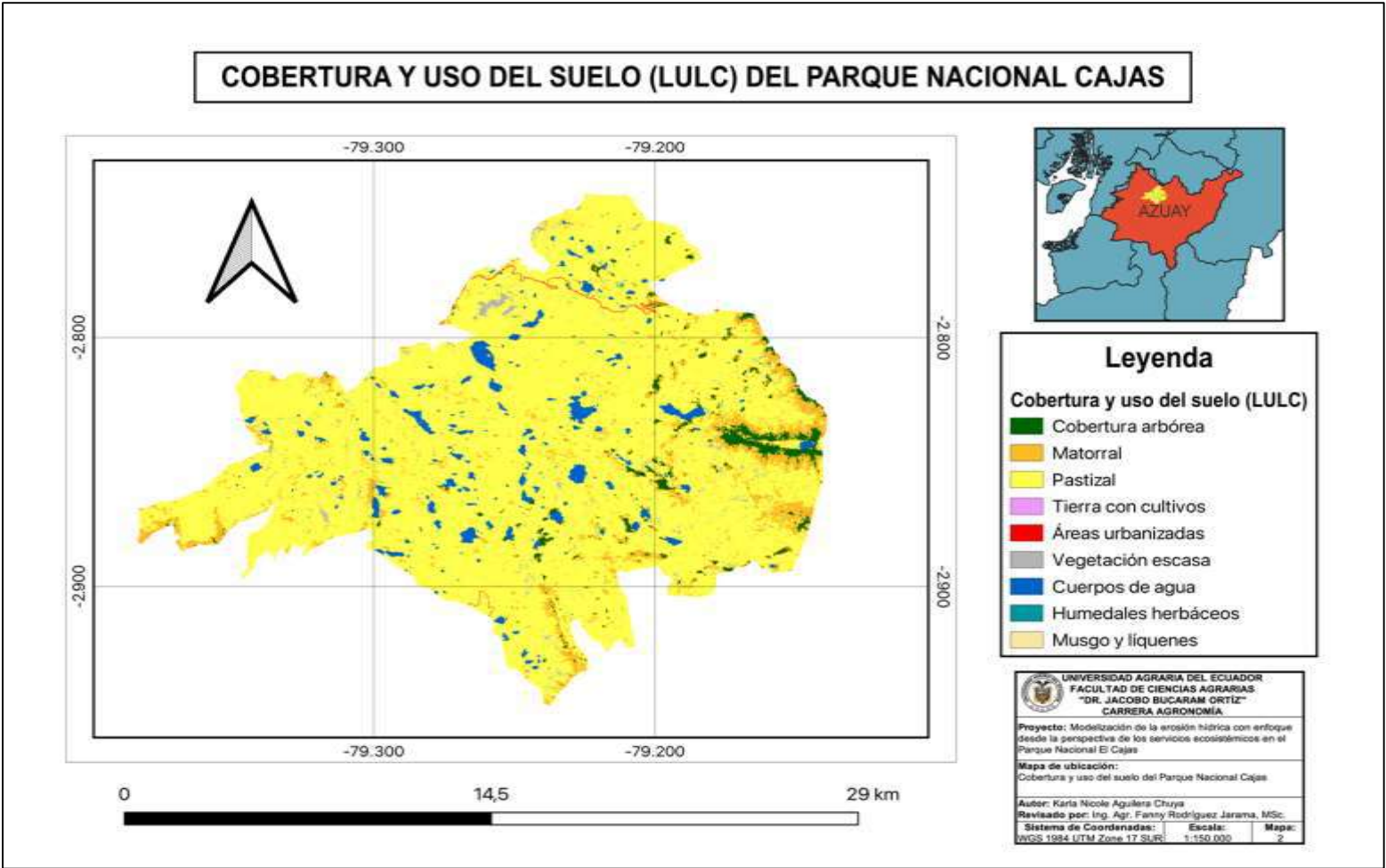
*Delimitación del Parque Nacional Cajas.*



Elaborado por: La Autora, 2025

Figura 7.

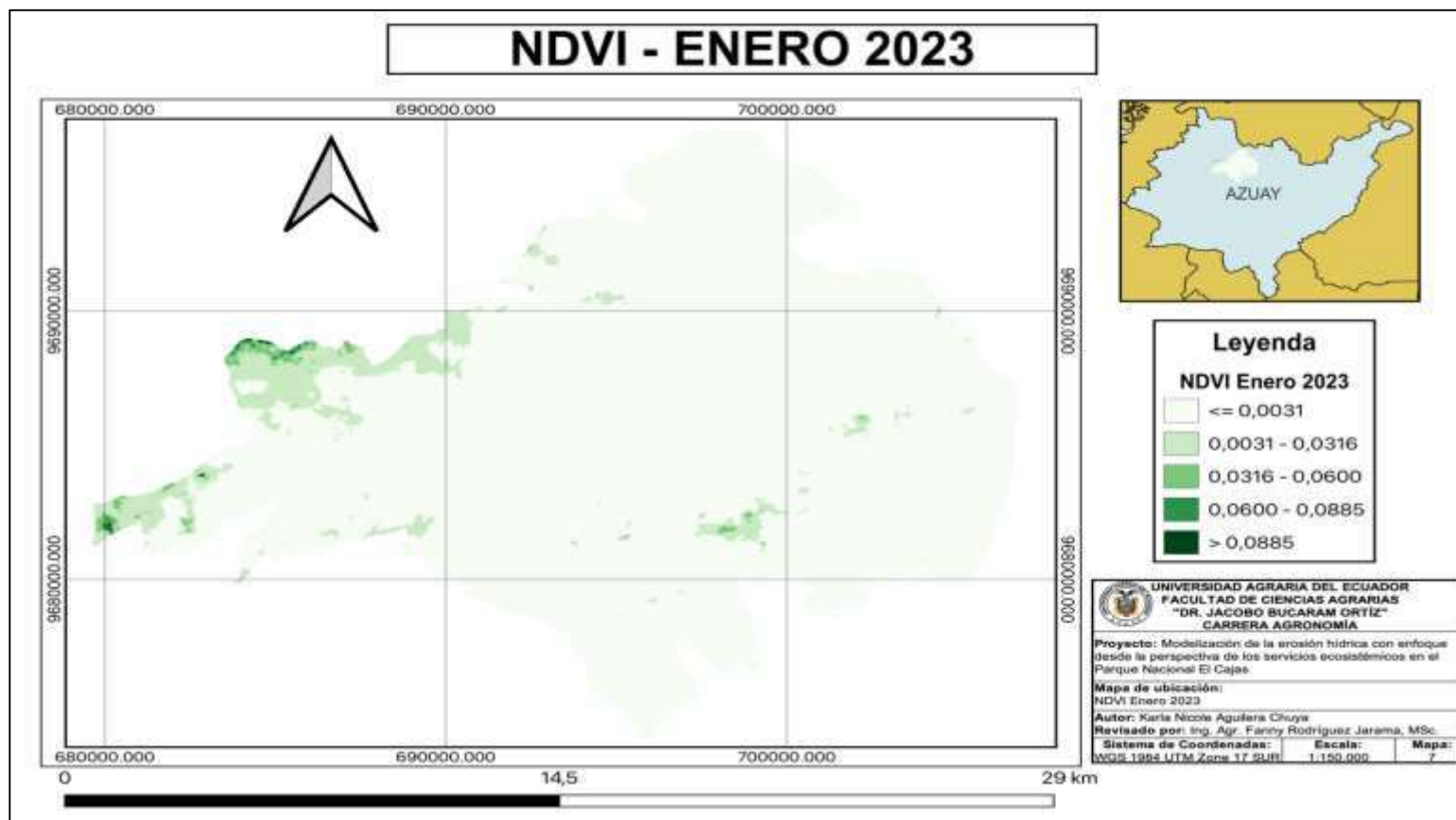
Clasificación de la cobertura y uso del suelo (LULC) del Parque Nacional Cajas.



Elaborado por: La Autora, 2025

Figura 8.

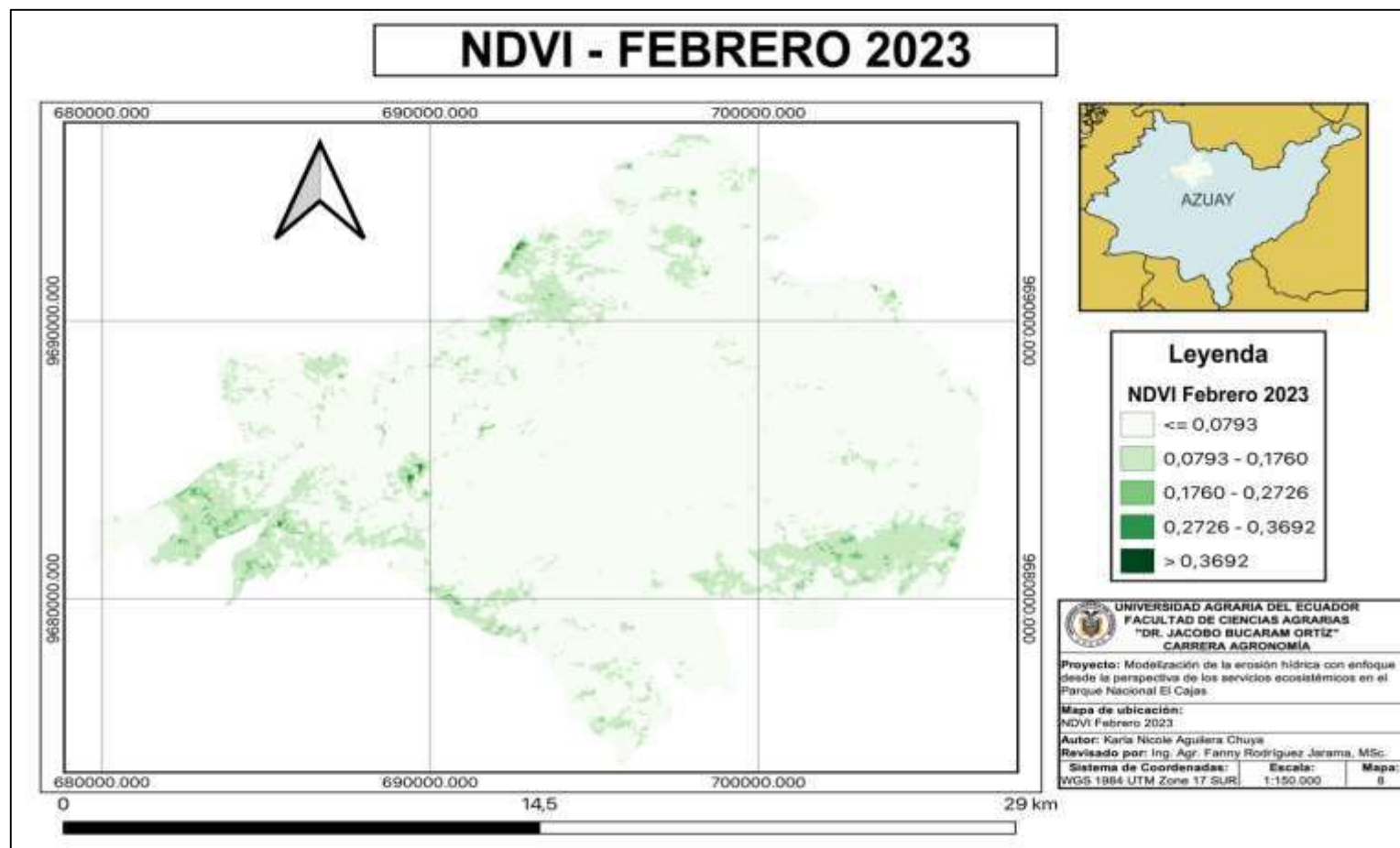
Mapa de NDVI en el mes de enero 2023.



Elaborado por: La Autora, 2025

Figura 9.

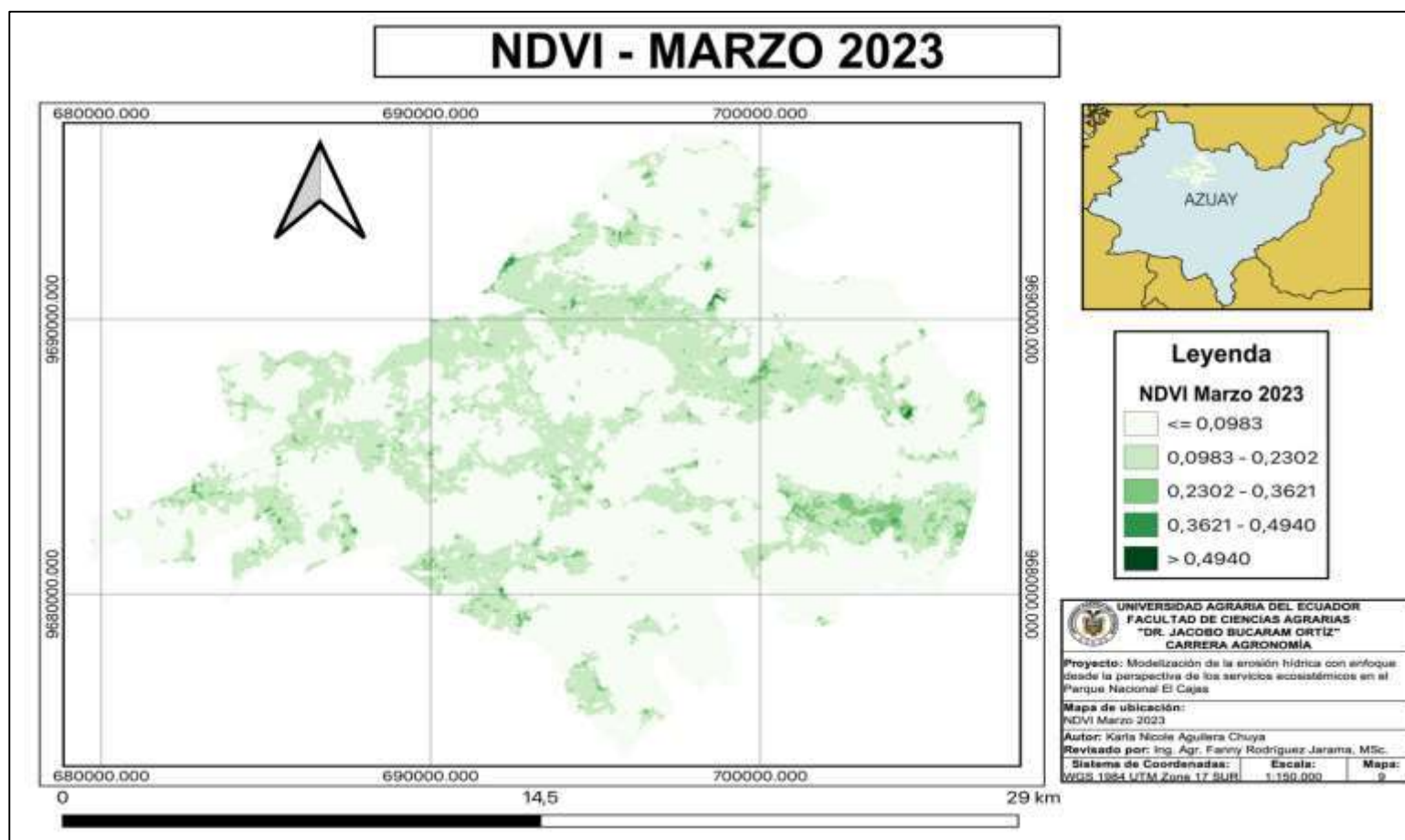
Mapa de NDVI en el mes de febrero 2023.



Elaborado por: La Autora, 2025

Figura 10.

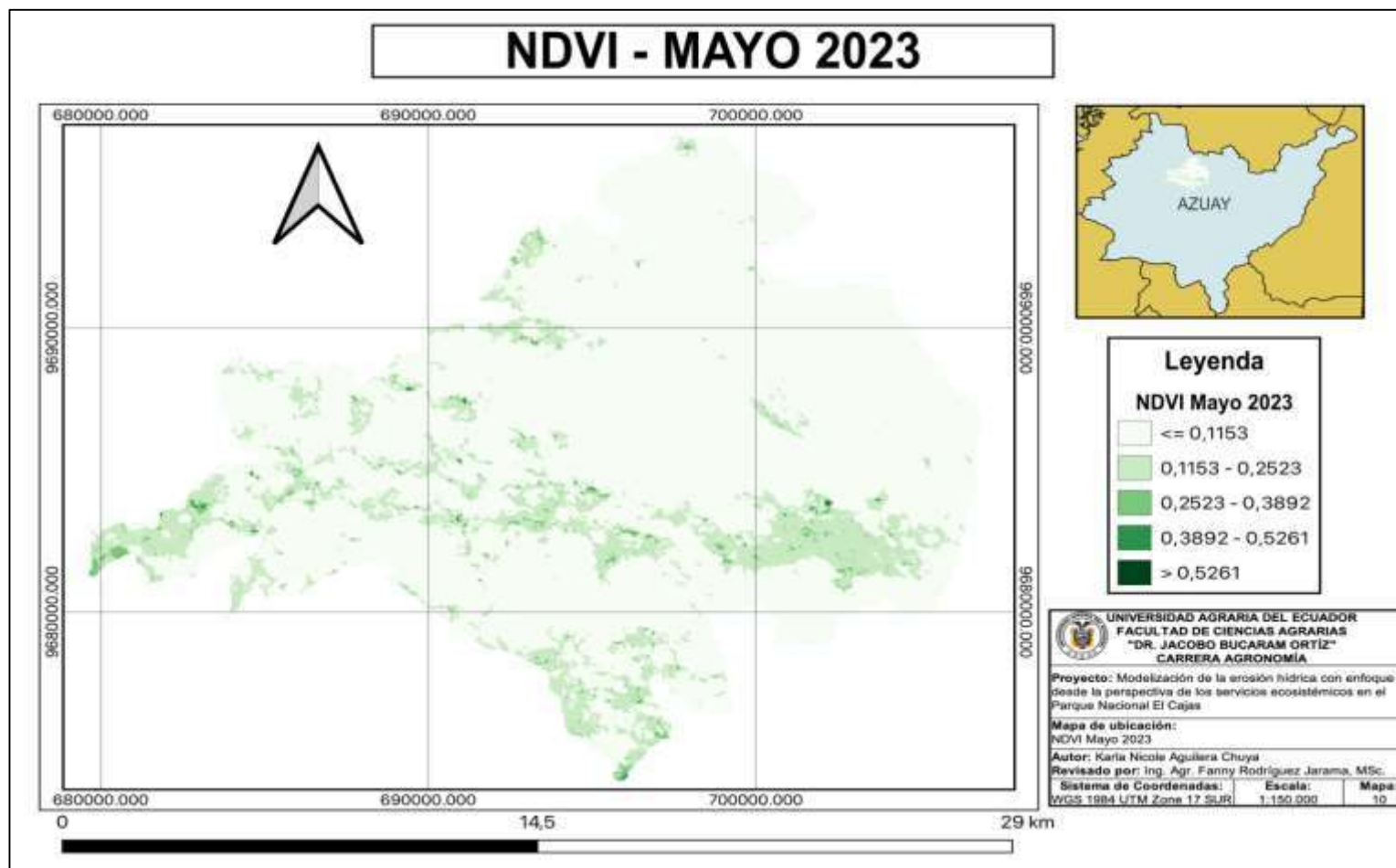
Mapa de NDVI en el mes de marzo 2023.



Elaborado por: La Autora, 2025

Figura 11.

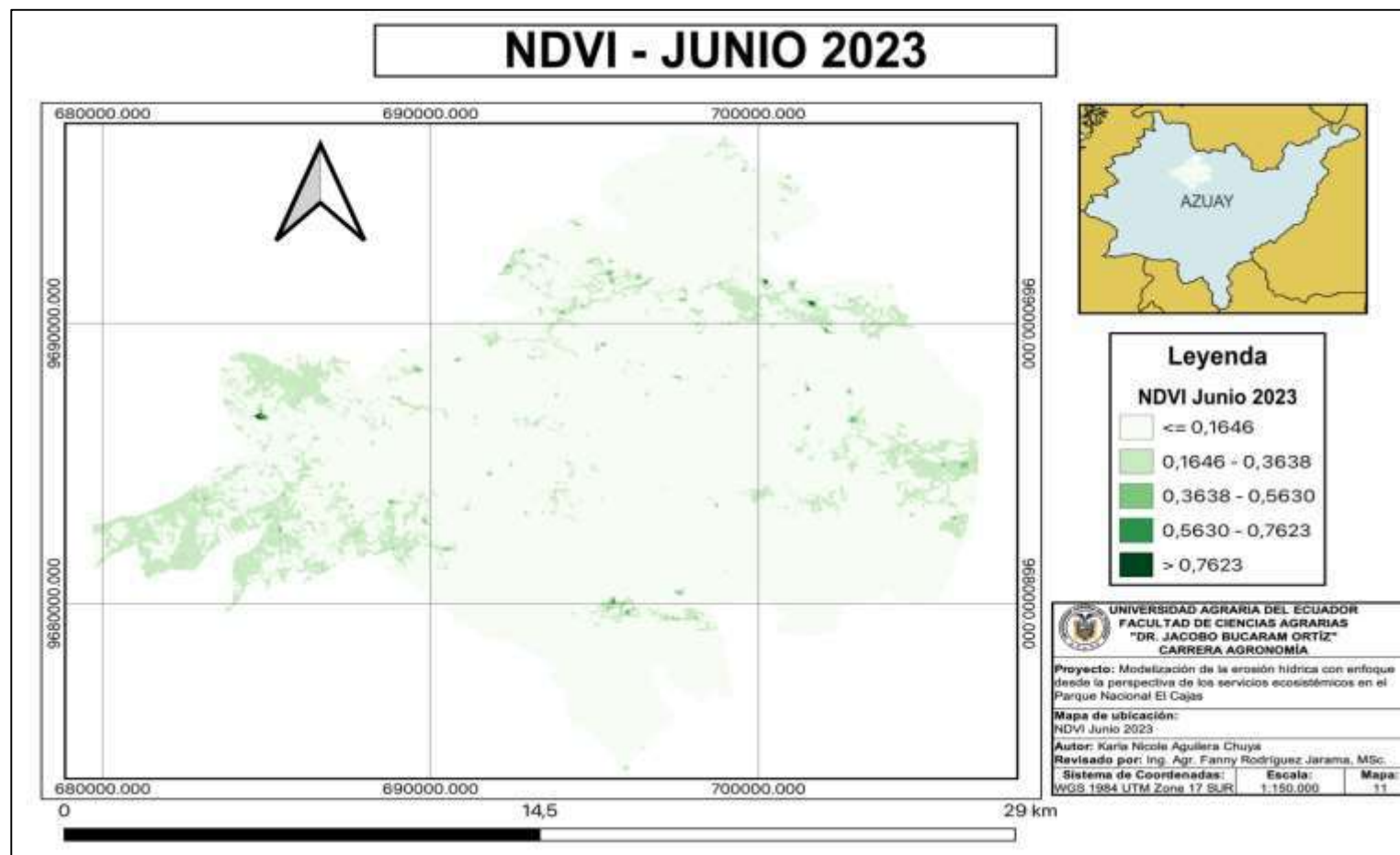
Mapa de NDVI en el mes de mayo 2023.



Elaborado por: La Autora, 2025

Figura 12.

Mapa de NDVI en el mes de junio 2023.

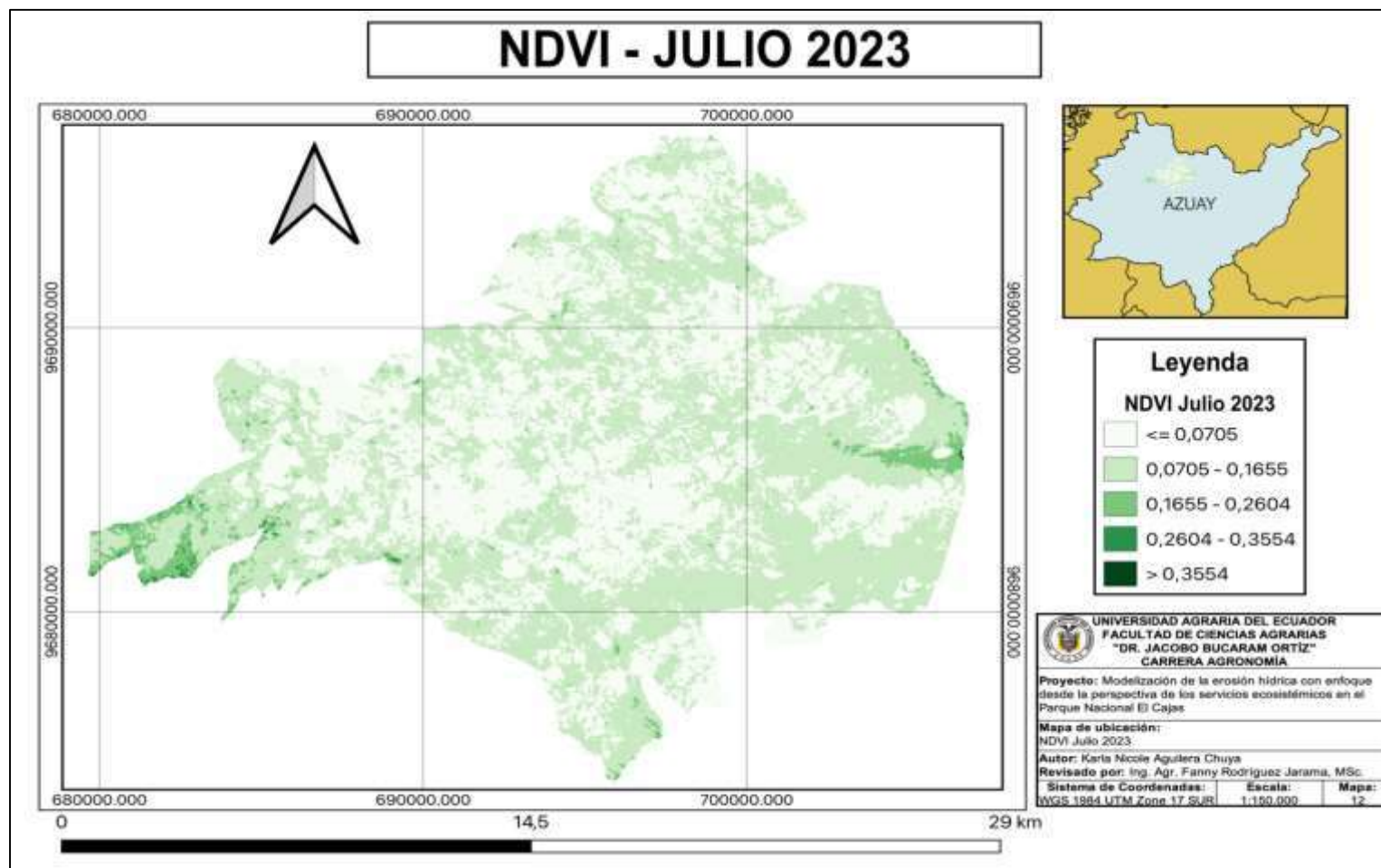


Elaborado por: La Autora, 2025



Figura 13.

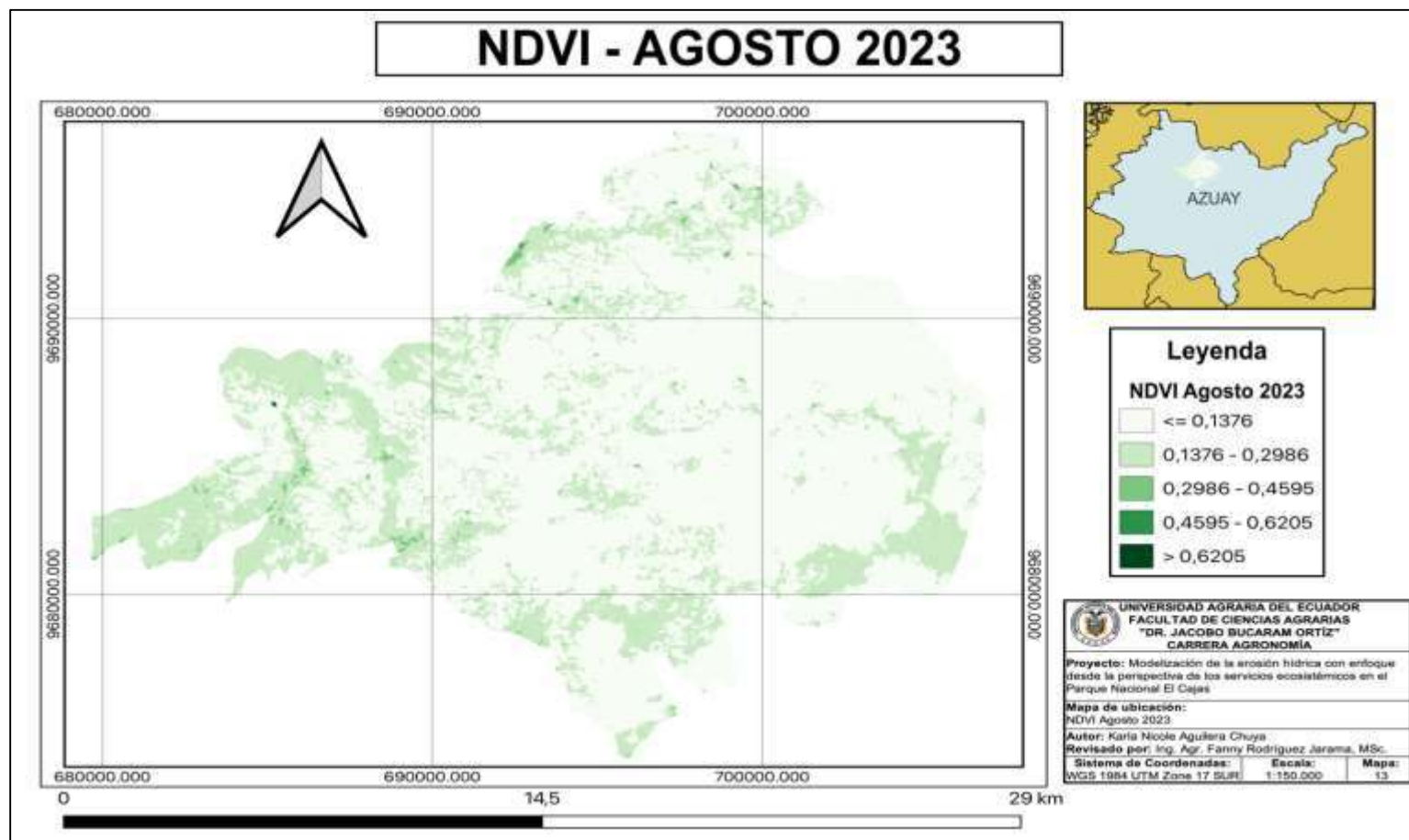
Mapa de NDVI en el mes de julio 2023.



Elaborado por: La Autora, 2025

Figura 14.

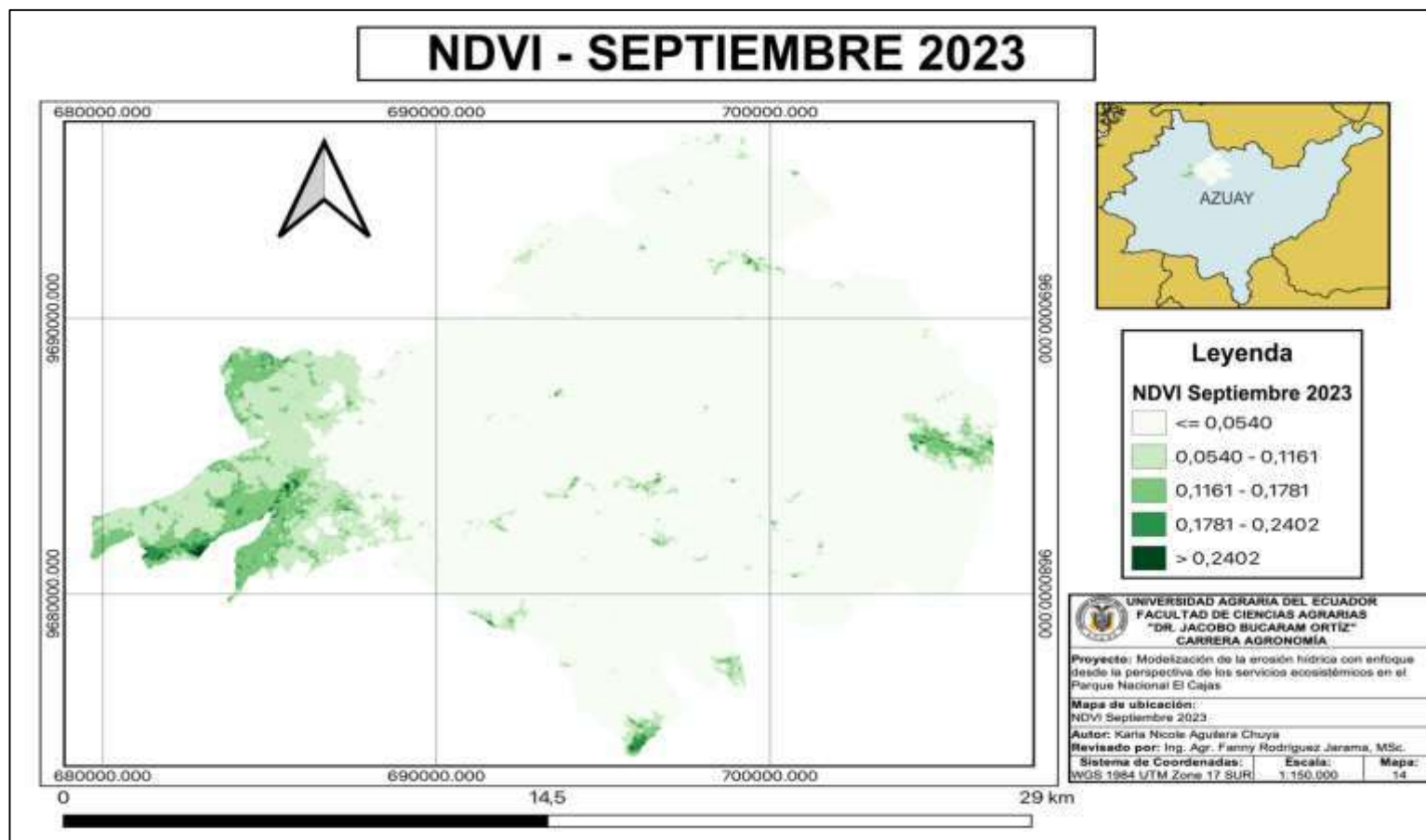
Mapa de NDVI en el mes de agosto 2023.



Elaborado por: La Autora, 2025

Figura 15.

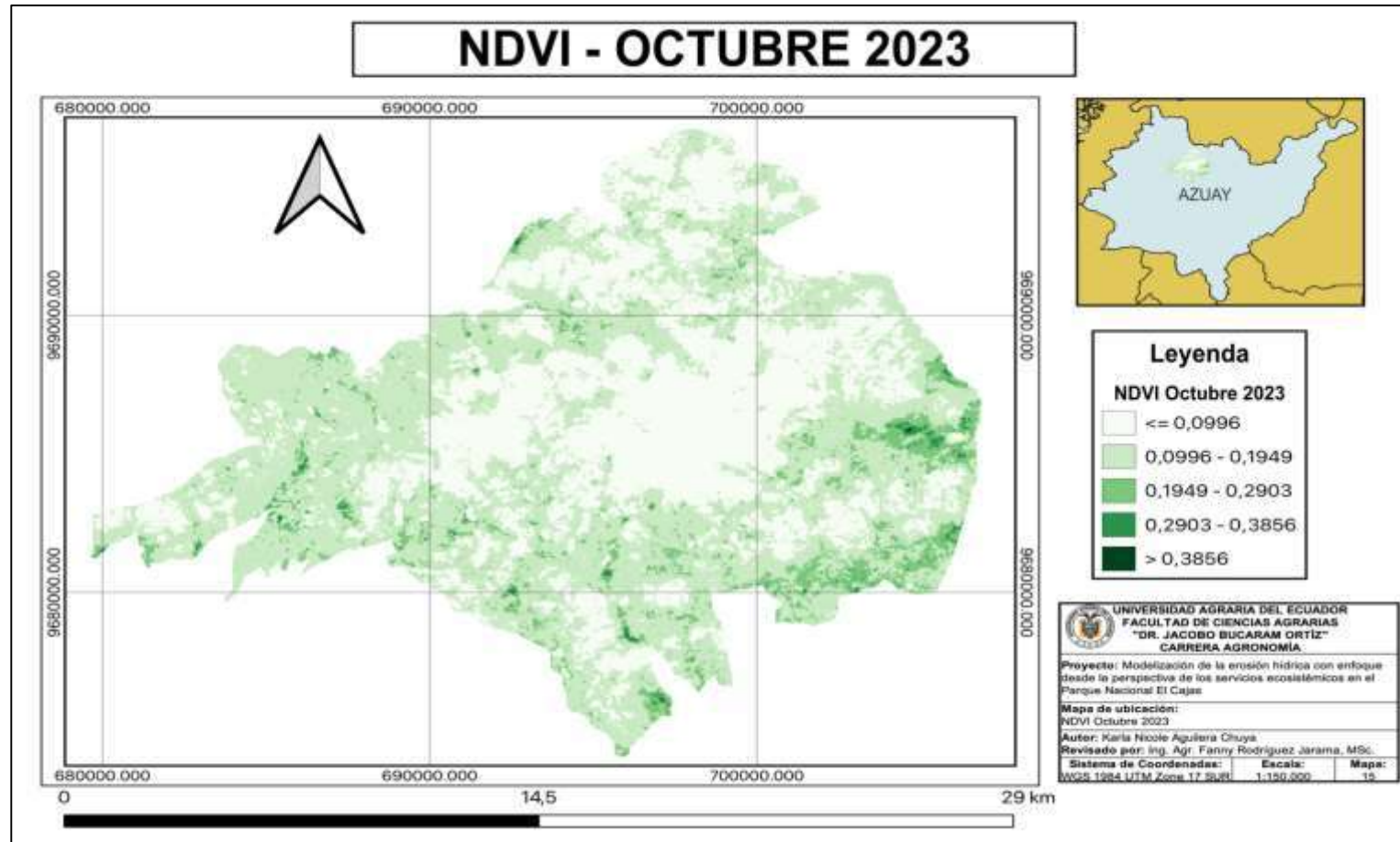
Mapa de NDVI en el mes de septiembre 2023.



Elaborado por: La Autora, 2025

Figura 16.

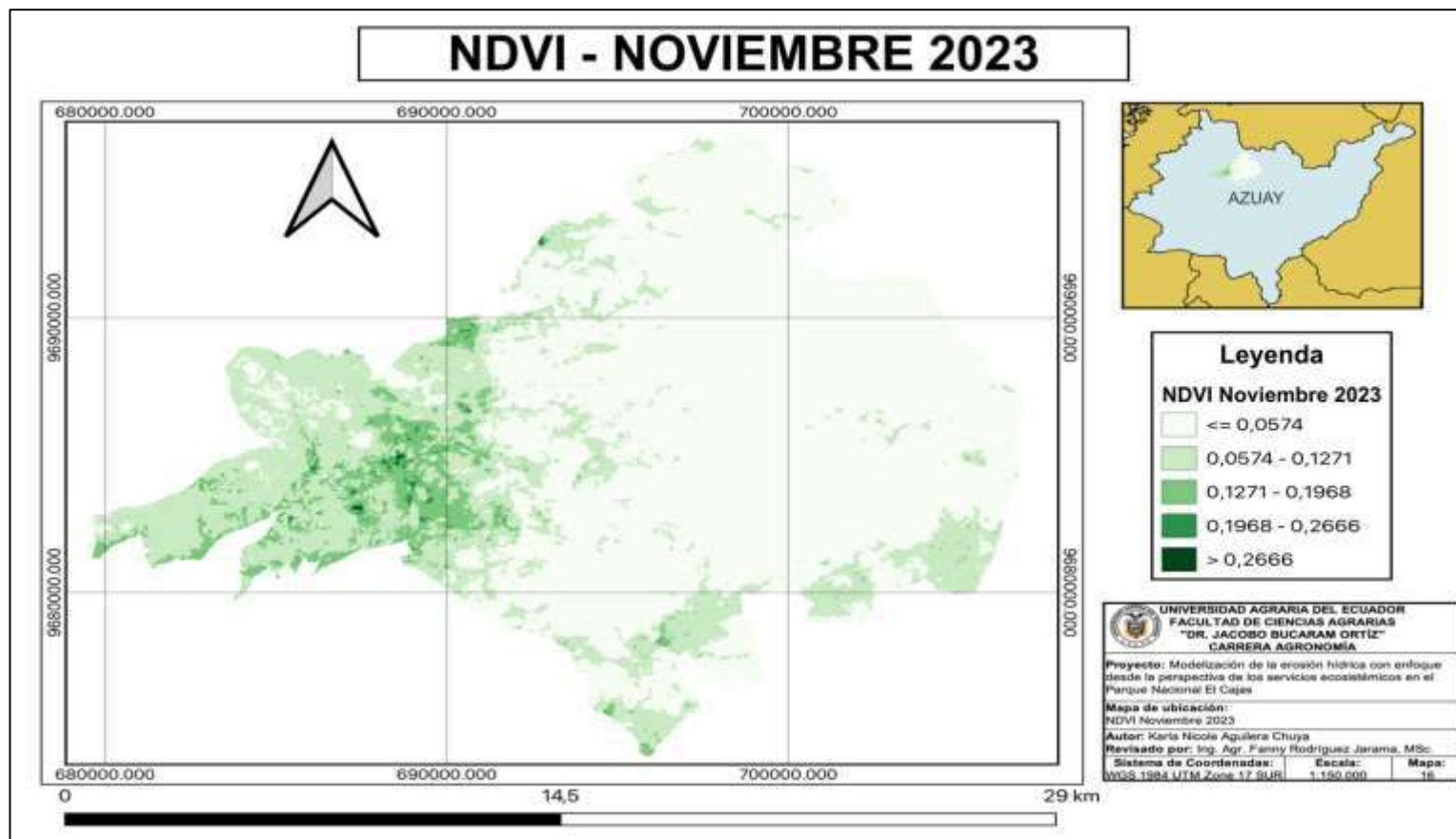
Mapa de NDVI en el mes de octubre 2023.



Elaborado por: La Autora, 2025

Figura 17.

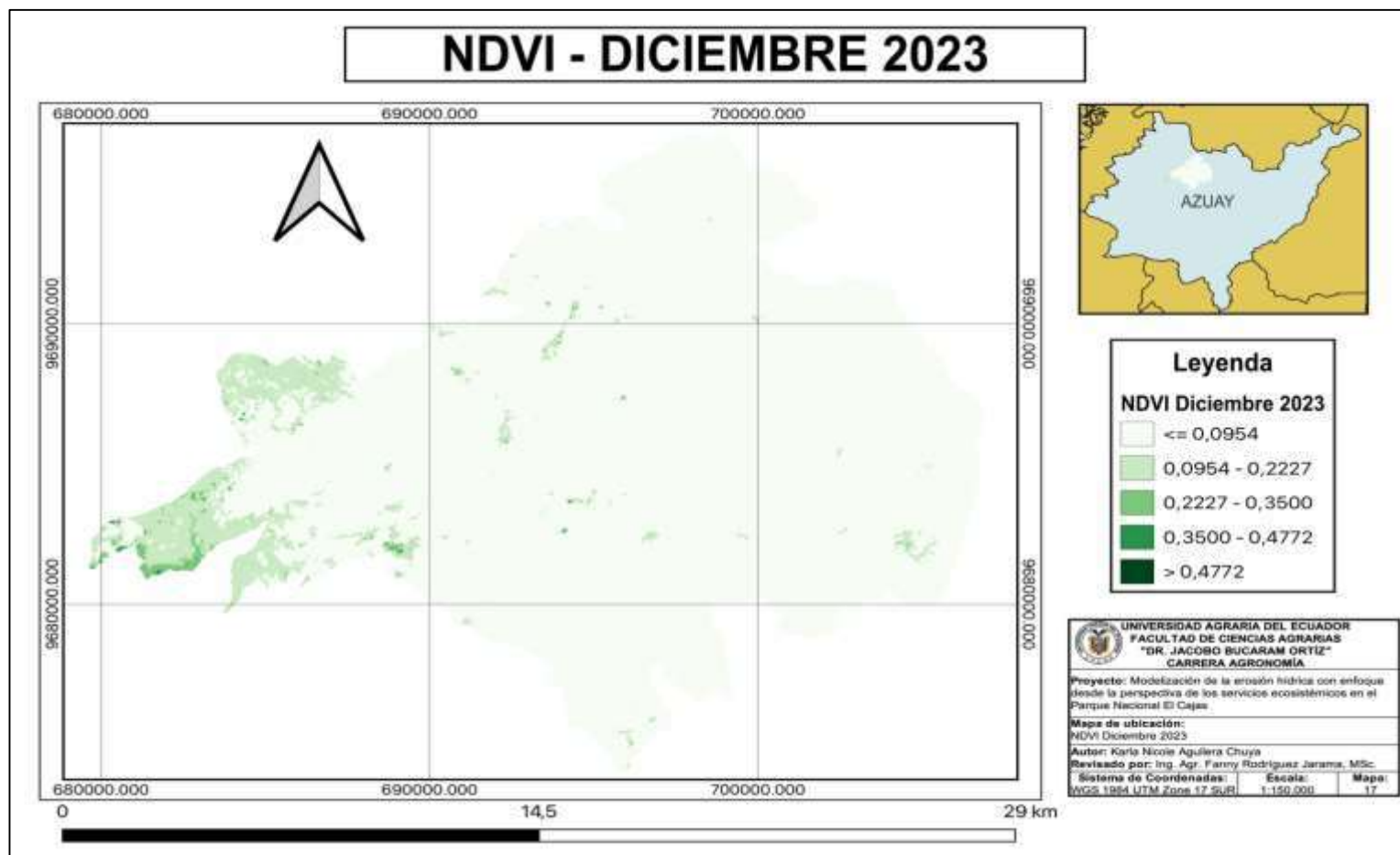
Mapa de NDVI en el mes de noviembre 2023.



Elaborado por: La Autora, 2025

Figura 18.

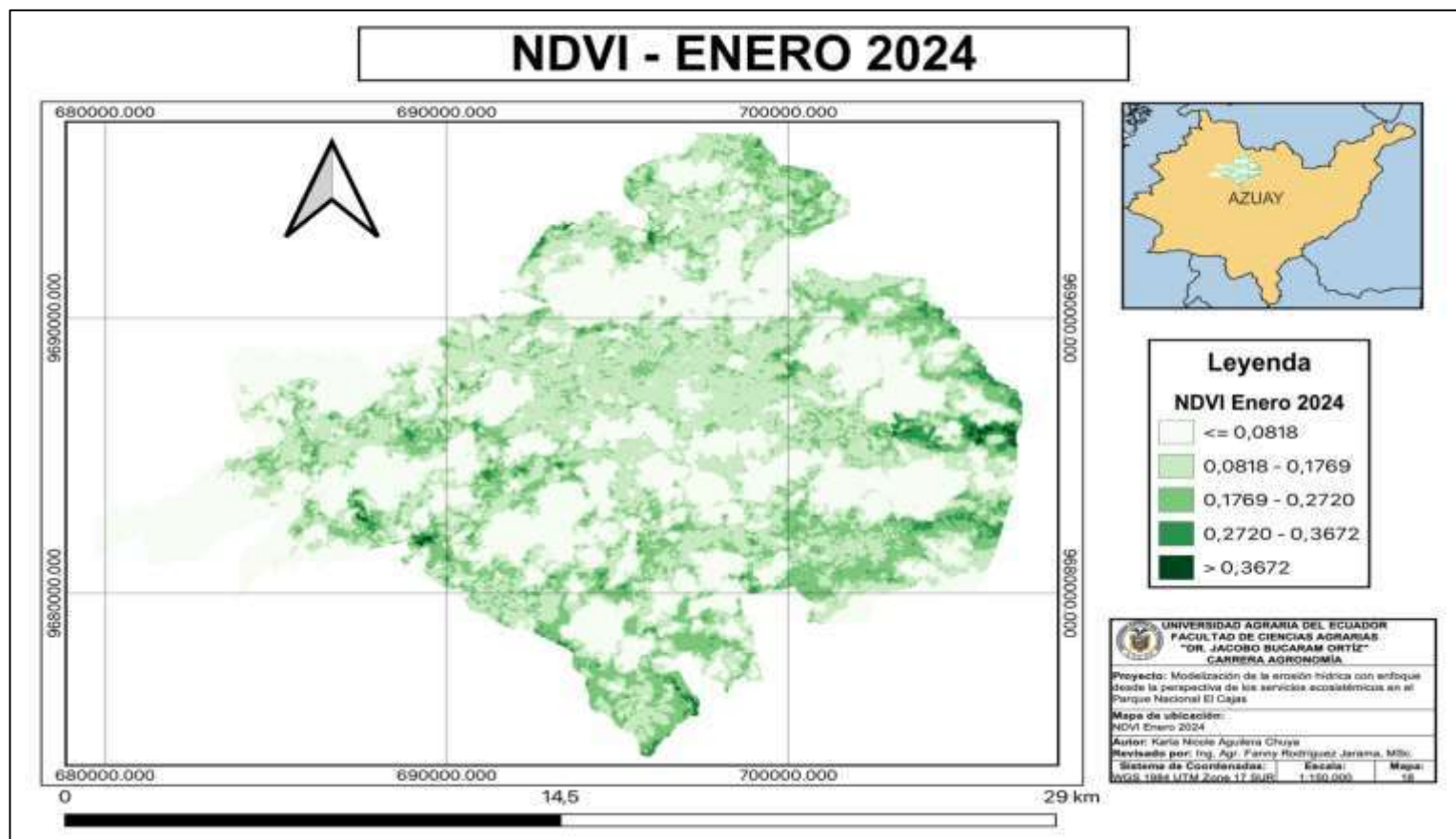
Mapa de NDVI en el mes de diciembre 2023.



Elaborado por: La Autora, 2025

Figura 19.

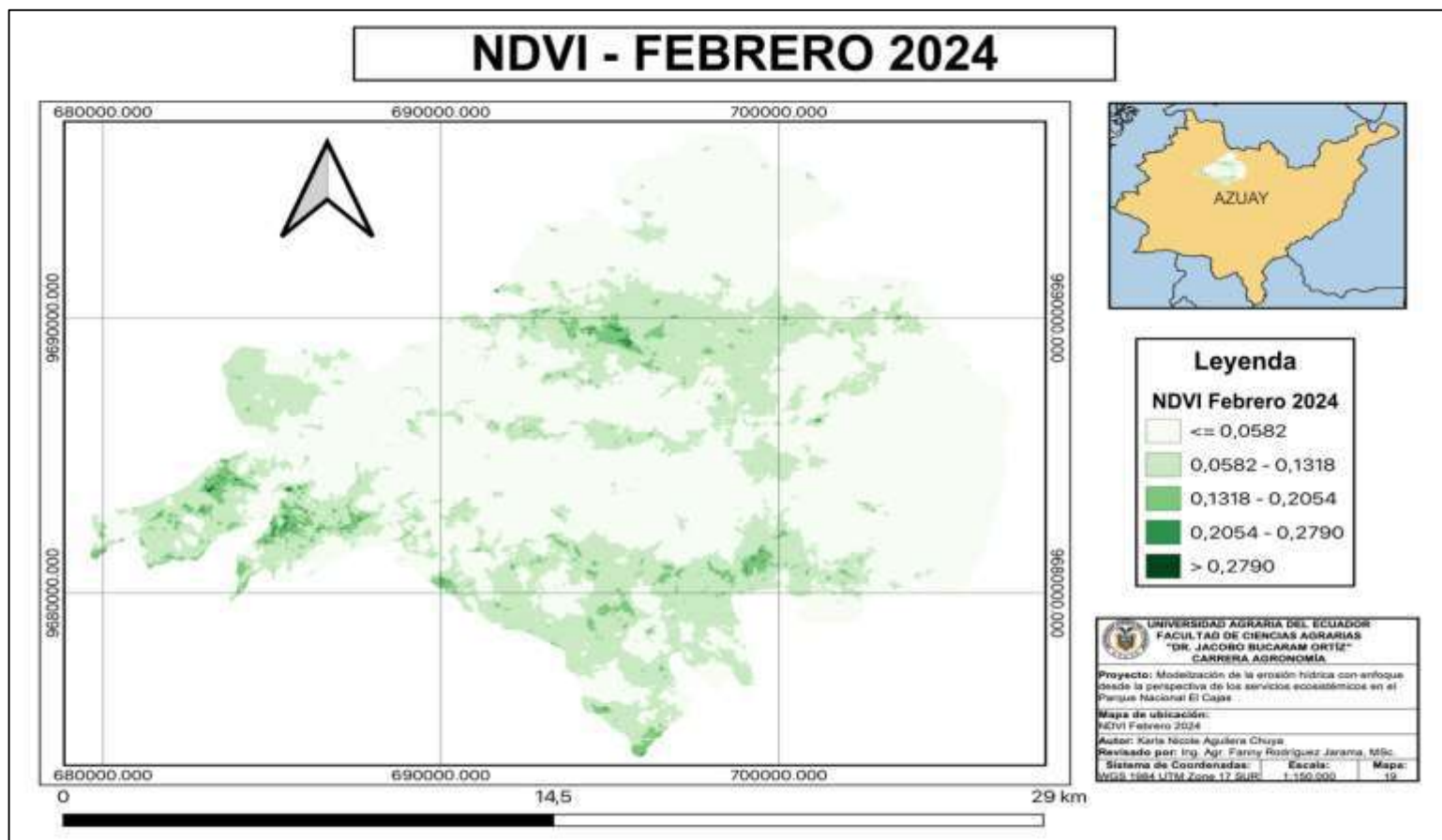
Mapa de NDVI en el mes de enero 2024.



Elaborado por: La Autora, 2025

Figura 20.

Mapa de NDVI en el mes de febrero 2024.

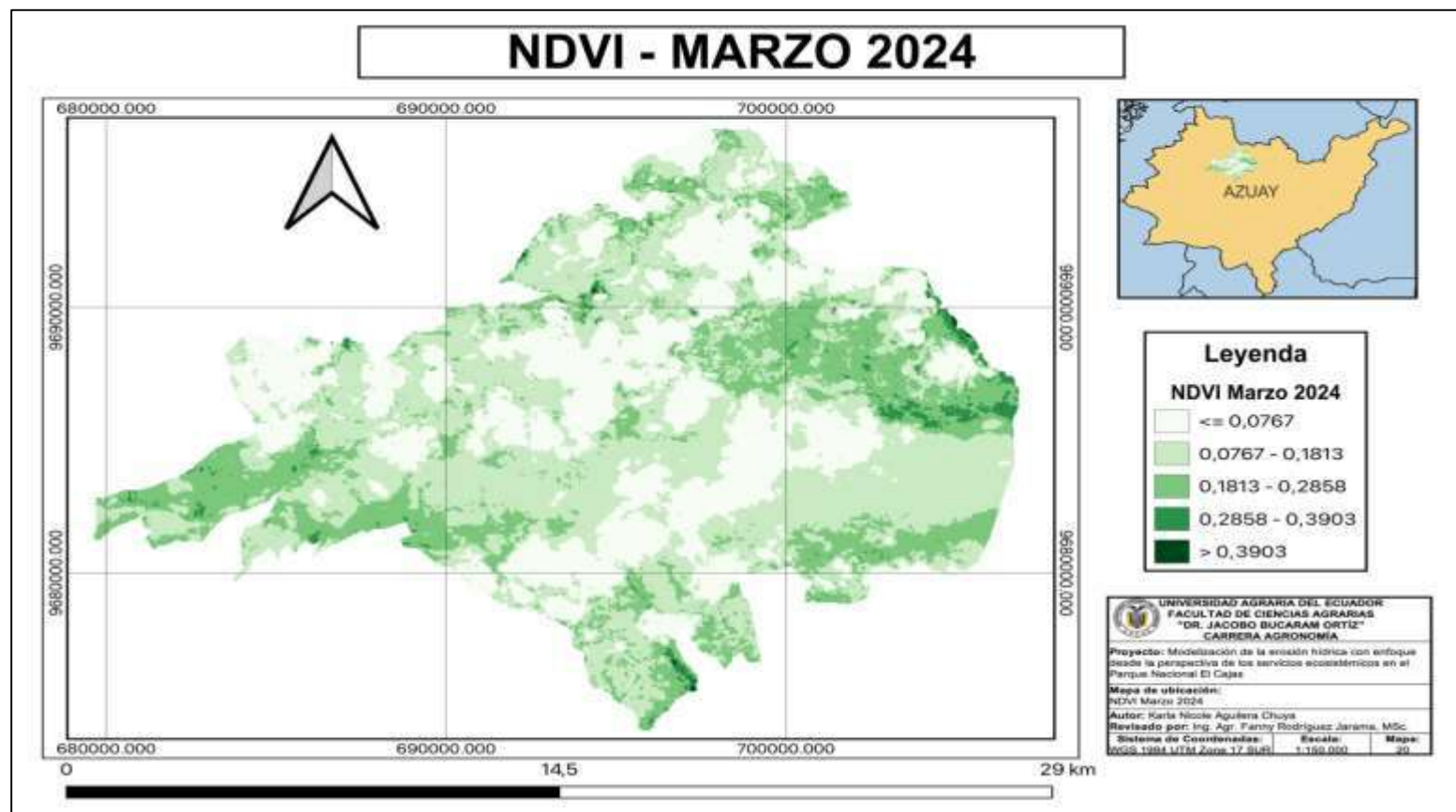


Elaborado por: La Autora, 2025



Figura 21.

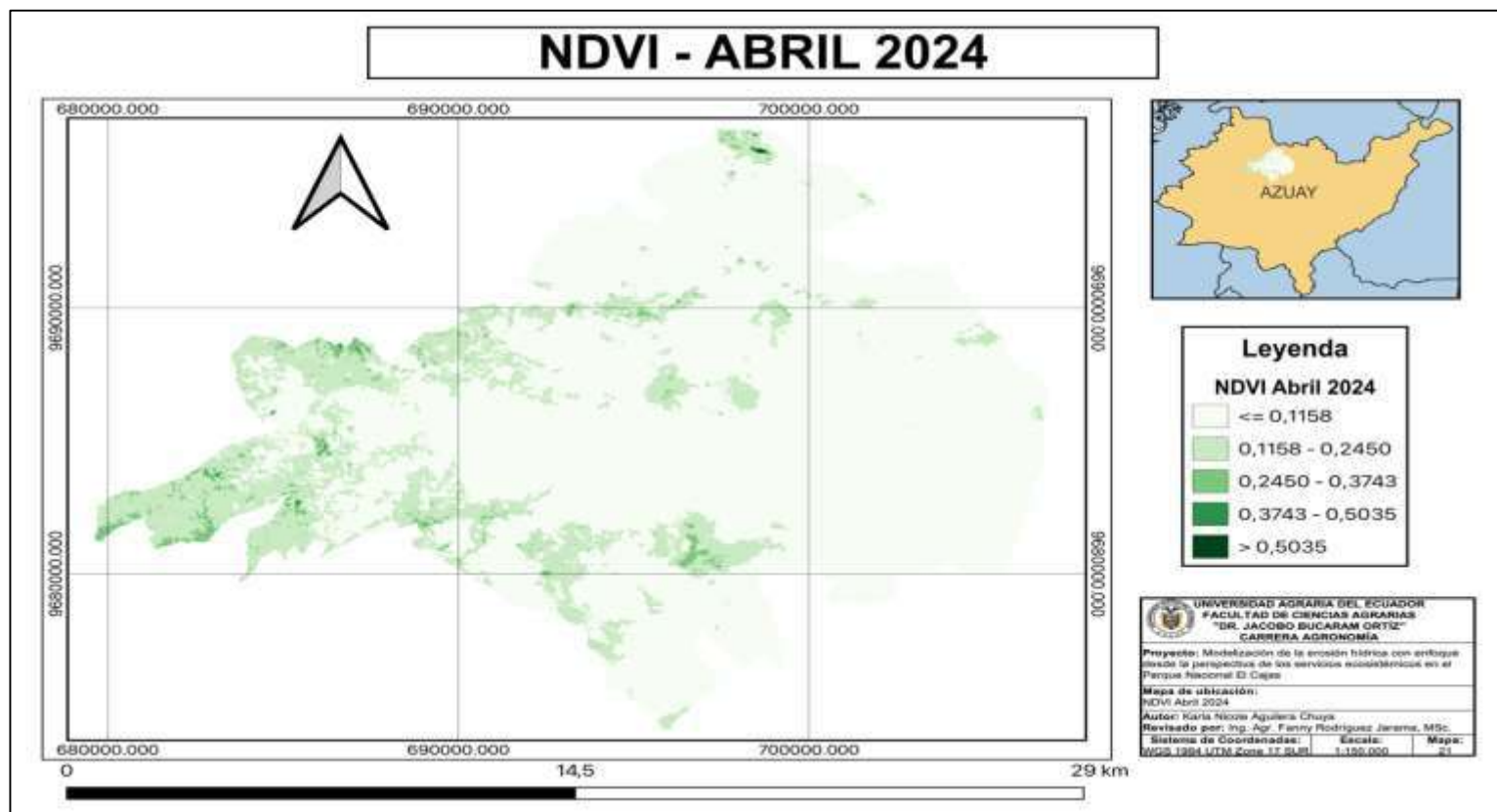
Mapa de NDVI en el mes de marzo 2024.



Elaborado por: La Autora, 2025

Figura 22.

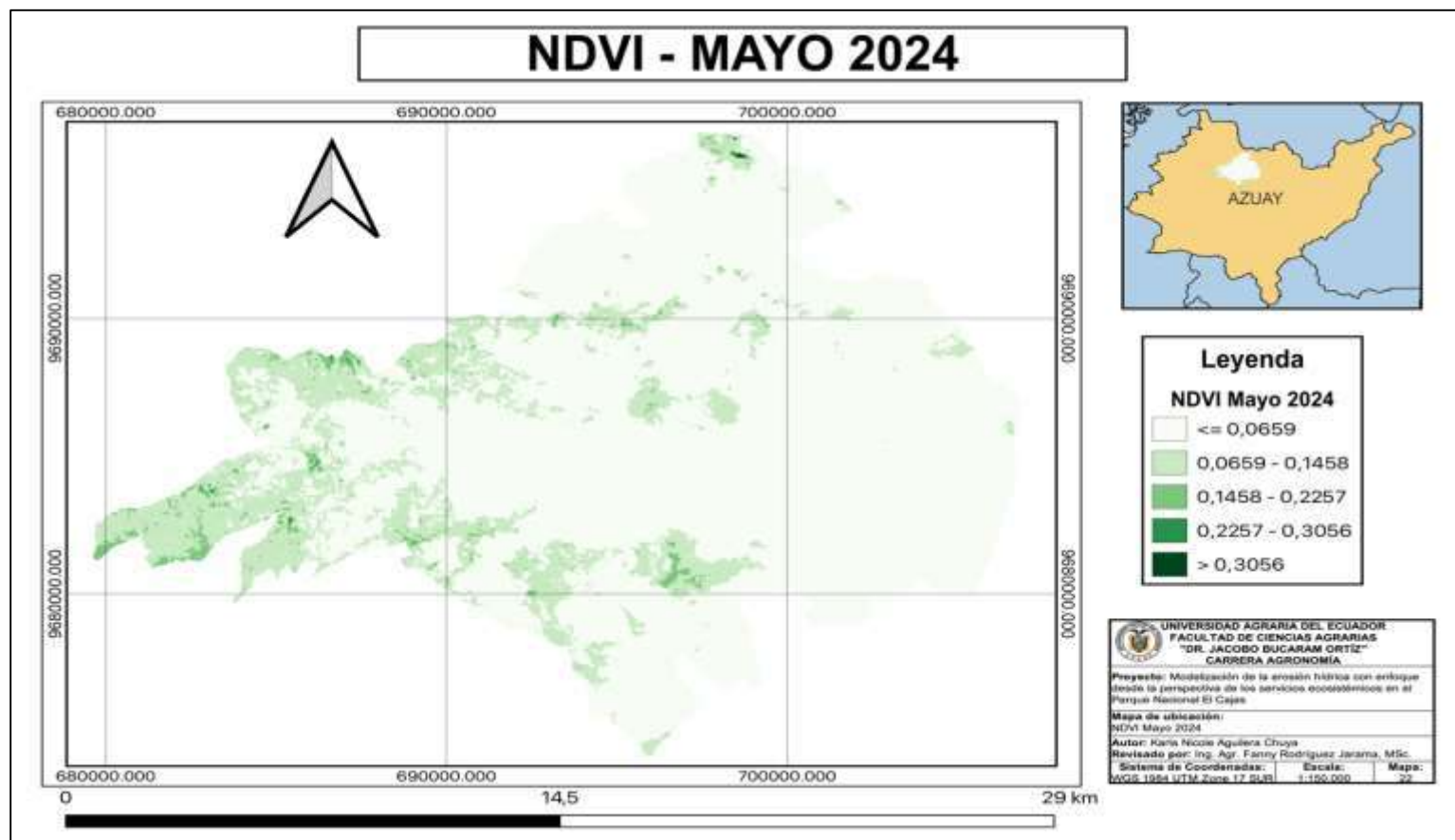
Mapa de NDVI en el mes de abril 2024.



Elaborado por: La Autora, 2025

Figura 23.

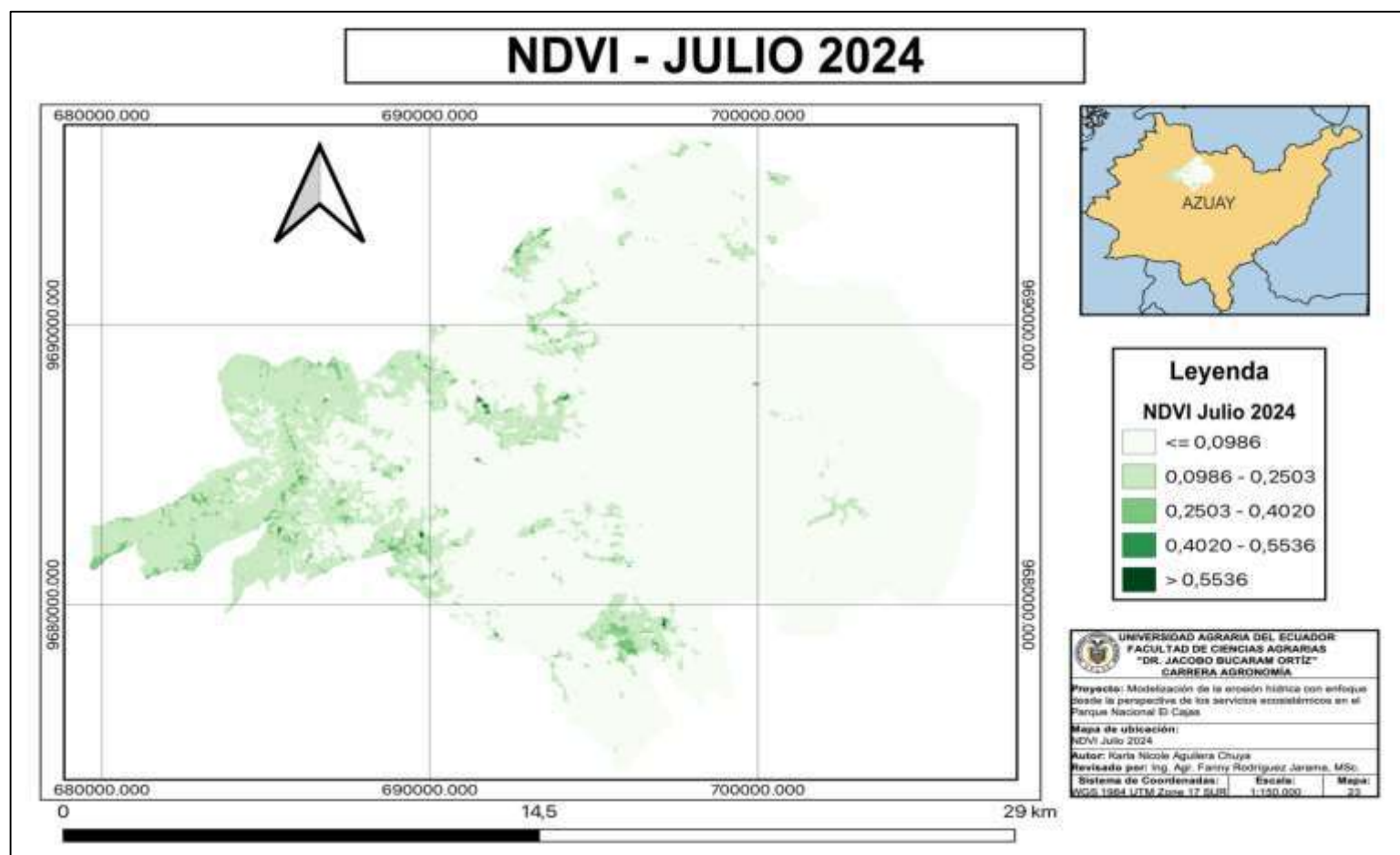
Mapa de NDVI en el mes de mayo 2024.



Elaborado por: La Autora, 2025

Figura 24.

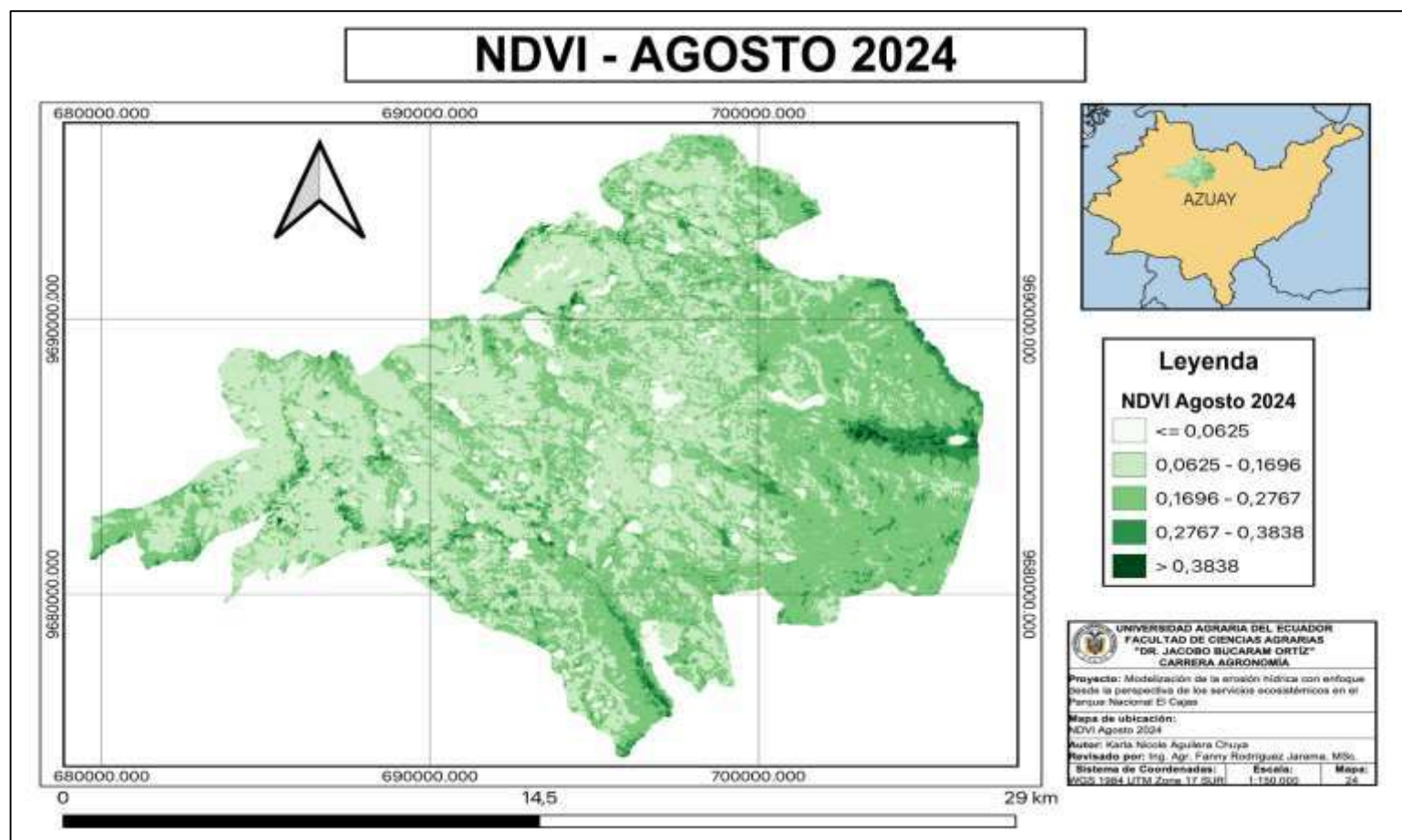
Mapa de NDVI en el mes de julio 2024.



Elaborado por: La Autora, 2025

Figura 25.

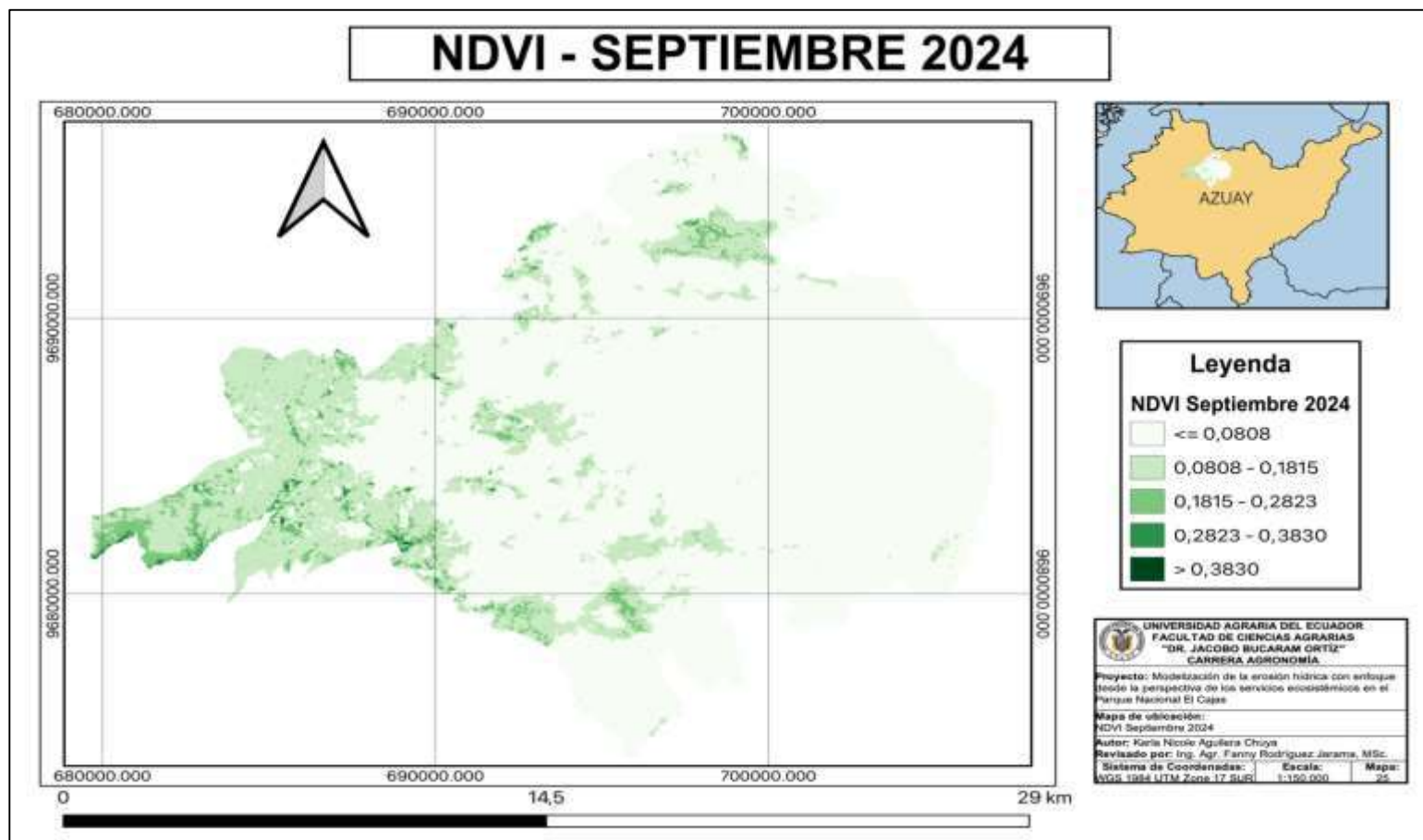
Mapa de NDVI en el mes de agosto 2024.



Elaborado por: La Autora, 2025

Figura 26.

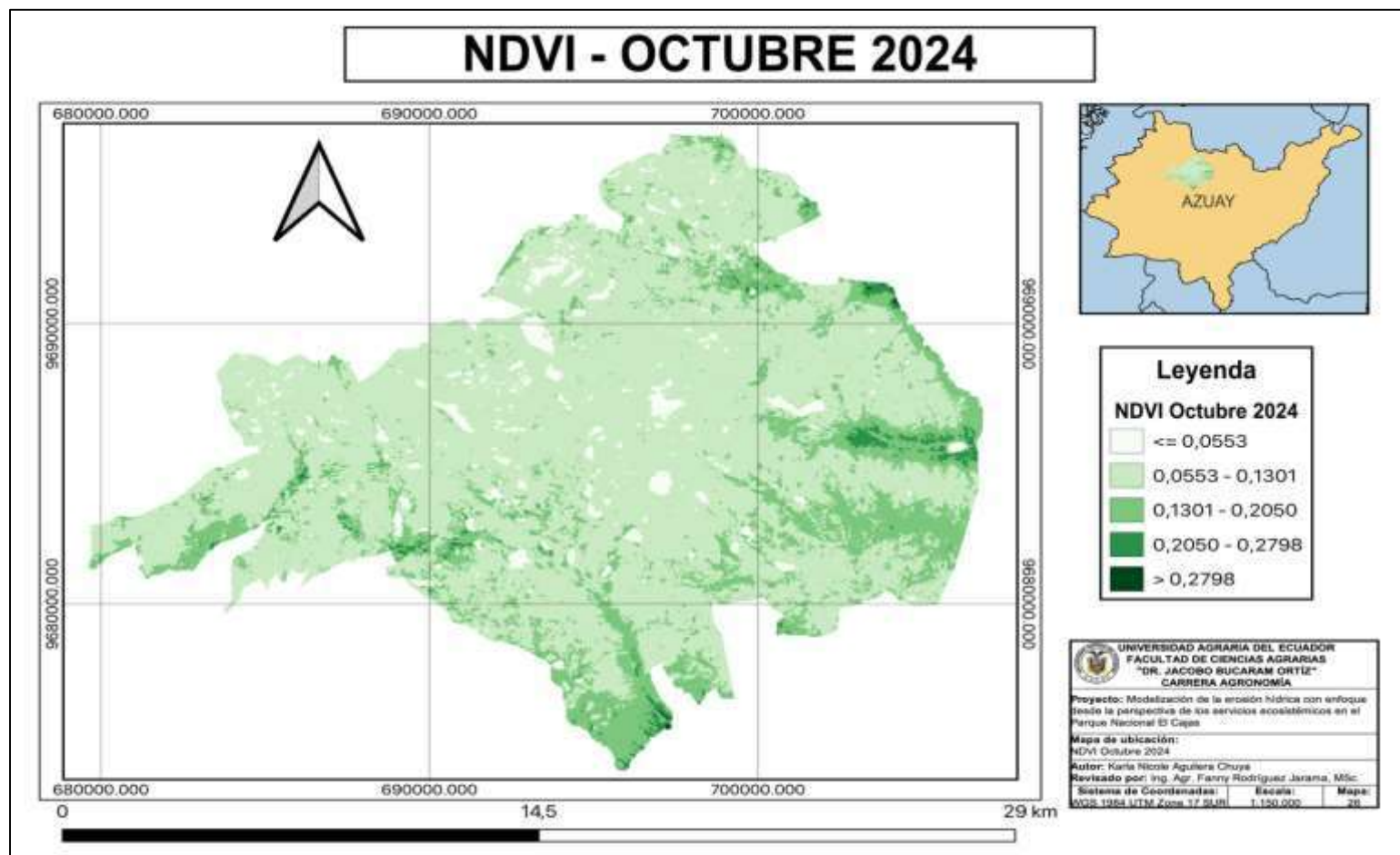
Mapa de NDVI en el mes de septiembre 2024.



Elaborado por: La Autora, 2025

Figura 27.

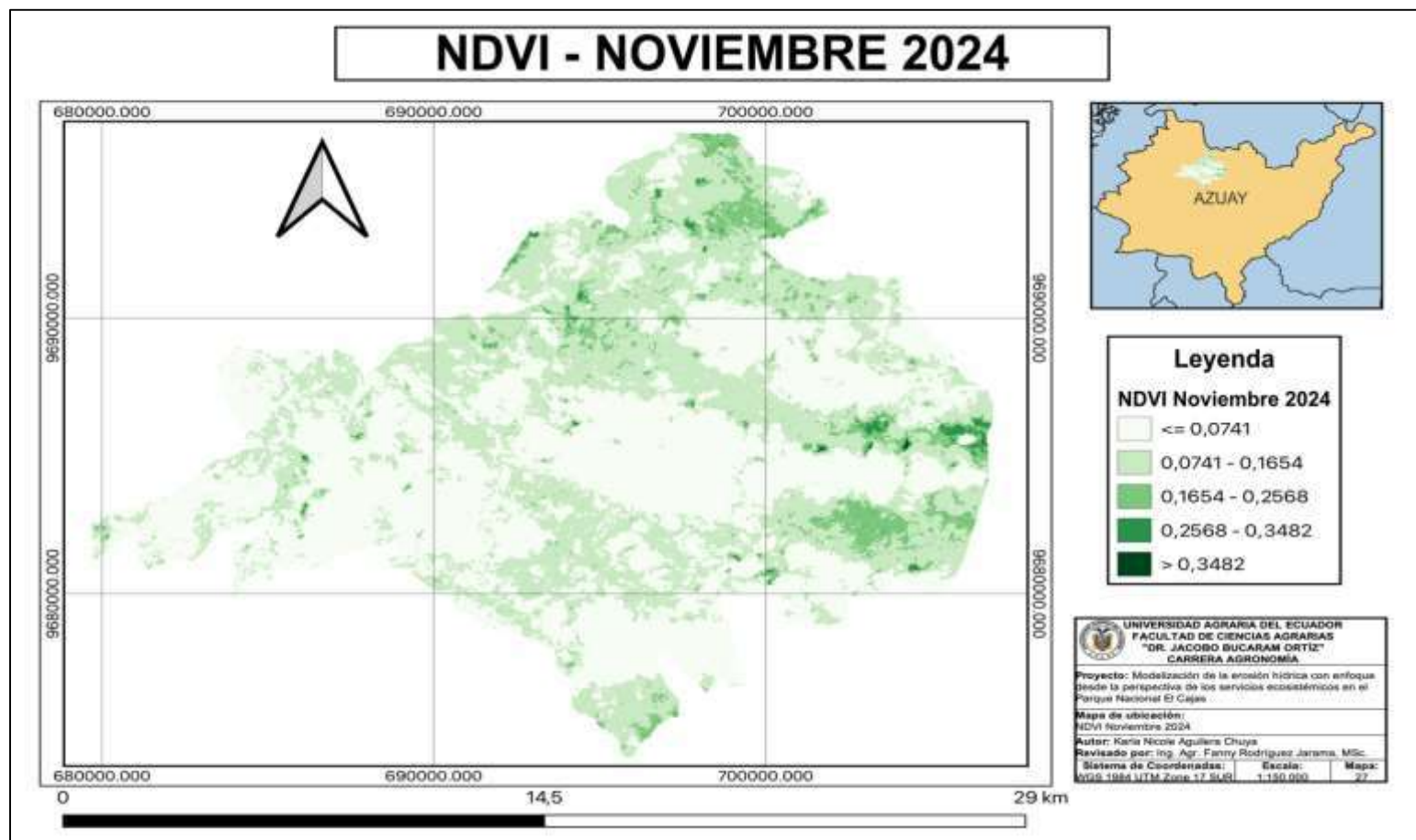
Mapa de NDVI en el mes de octubre 2024.



Elaborado por: La Autora, 2025

Figura 28.

Mapa de NDVI en el mes de noviembre 2024.

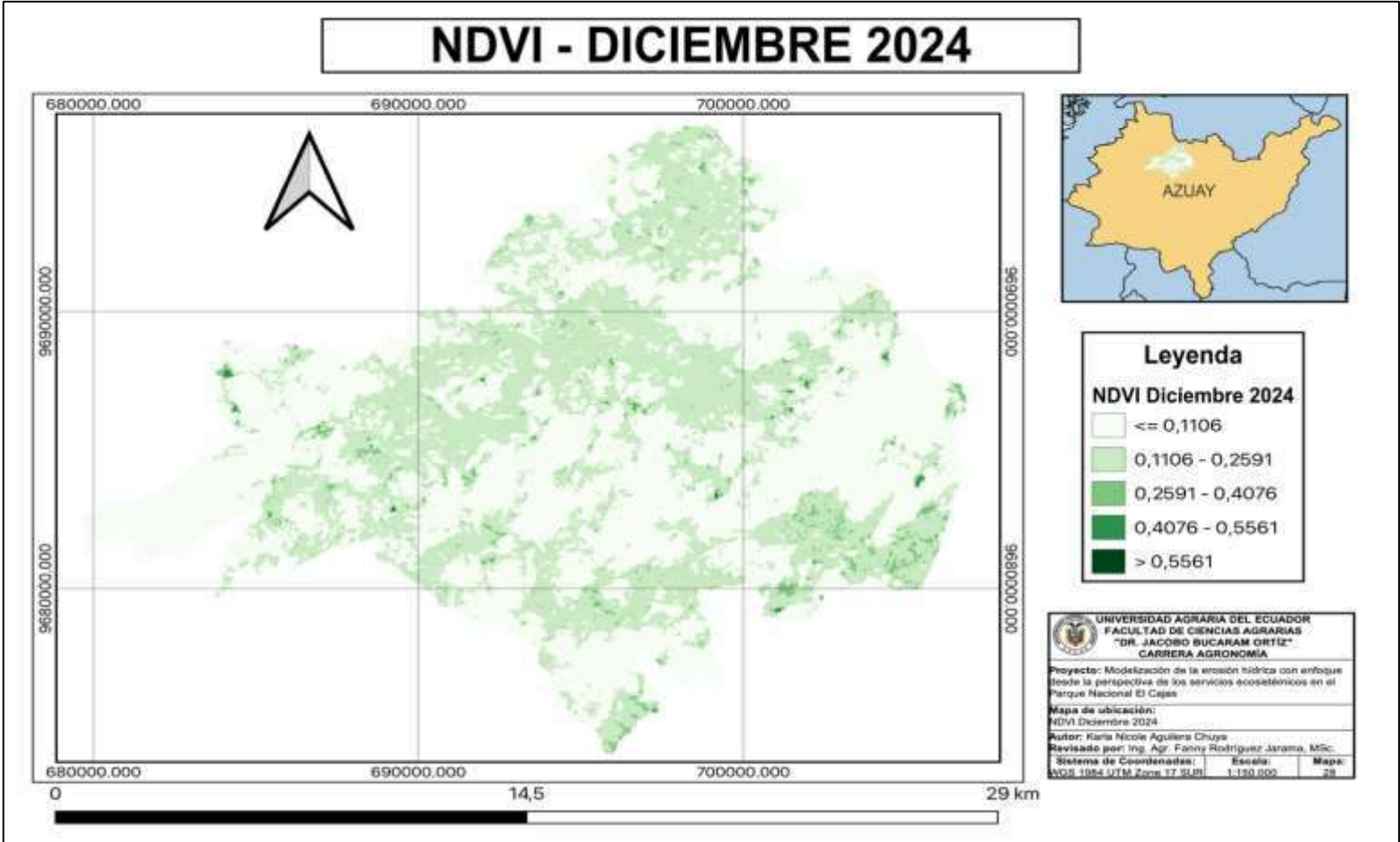


Elaborado por: La Autora, 2025



Figura 29.

Mapa de NDVI en el mes de diciembre 2024.



Elaborado por: La Autora, 2025

**Figura 30.**

***Visita al Parque Nacional Cajas con la directora de tesis.***



**Elaborado por:** La Autora, 2025

**Figura 31.**

***Flora nativa del Parque Nacional Cajas.***



**Elaborado por:** La Autora, 2025

**Figura 32.**

***Vegetación del Parque Nacional Cajas.***



**Elaborado por:** La Autora, 2025

**Figura 33.**

***Evidencia de pastizales en el Parque Nacional Cajas.***



**Elaborado por:** La Autora, 2025

**Figura 34.**

***Actividad turística como senderismo en Tres Cruces - Parque Nacional Cajas.***



**Elaborado por:** La Autora, 2025

**Tabla 21.*****Catálogo de clases de cobertura del área de estudio 2023 – 2024.***

| <b>Número de clase</b> | <b>Código de ref.</b> | <b>Clases de cobertura</b> |
|------------------------|-----------------------|----------------------------|
| 10                     | #006400               | Tree cover                 |
| 20                     | #ffbb22               | Shrubland                  |
| 30                     | #ffff4c               | Grassland                  |
| 40                     | #f096ff               | Cropland                   |
| 50                     | #fa0000               | Built-up                   |
| 60                     | #b4b4b4               | Bare/ sparse vegetation    |
| 70                     | #f0f0f0               | Snow and ice               |
| 80                     | #0064c8               | Permanent water bodies     |
| 90                     | #0096a0               | Herbaceous wetland         |
| 95                     | #00cf75               | Mangroves                  |
| 100                    | #fae6a0               | Moss and lichen            |

**Fuente:** Google Earth Engine (2021). **Elaborado por:** La Autora, 2025