**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**



Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas

Carrera De Ingeniería en Software

**“DESARROLLO DE UN SIG WEB PARA LA PREDICCIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA DE SUELOS UTILIZANDO SENSORES REMOTOS Y TÉCNICAS DE MACHINE LEARNING (ML) EN LA PROVINCIA DE IMBABURA.”**

Trabajo de grado previo a la obtención del título de Ingeniero de Software presentado ante la ilustre Universidad Técnica del Norte.

Autor:

Mario Andrés Salazar Anrango

Director:

MSc. José Fernando Garrido Sánchez

Ibarra – Ecuador

2023

|  |  |
| --- | --- |
| **Logotipo  Descripción generada automáticamente** | **UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  **BIBLIOTECA UNIVERSITARIA**  **AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE**  **LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE** |

1. **IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA**

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **DATOS DE CONTACTO** | | | |
| **CÉDULA DE IDENTIDAD:** | 1003938477 | | |
| **APELLIDOS Y NOMBRES:** | Salazar Anrango Mario Andrés | | |
| **DIRECCIÓN:** | El Tejar – Vía Santa Rosa 14-42 | | |
| **EMAIL:** | [masalazara@utn.edu.ec](mailto:masalazara@utn.edu.ec) | | |
| **TELÉFONO FIJO:** |  | **TELÉFONO MÓVIL:** | 0979432426 |

|  |  |
| --- | --- |
| **DATOS DE LA OBRA** | |
| **TÍTULO:** | DESARROLLO DE UN SIG WEB PARA LA PREDICCIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA DE SUELOS UTILIZANDO SENSORES REMOTOS Y TÉCNICAS DE MACHINE LEARNING (ML) EN LA PROVINCIA DE IMBABURA. |
| **AUTOR (ES):** | Salazar Anrango Mario Andrés |
| **FECHA:** | 02/02/2024 |
| **PROGRAMA:** | |  |  | | --- | --- | | Pregrado | Postgrado | |
| **TÍTULO POR EL QUE OPTA:** | Ingeniero en Software |
| **DIRECTOR:** | MSc. José Fernando Garrido Sánchez |
| **ASESOR:** | MSc. Pedro David Granda Gudiño |

1. **CONSTANCIAS**

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los …. días del mes de ……… de 2023

**EL AUTOR:**

|  |
| --- |
| ----------------------------------------------------------------  ESTUDIANTE Sr. Mario Andrés Salazar Anrango  1003938477 |

|  |  |
| --- | --- |
| **Logotipo  Descripción generada automáticamente** | **UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  **FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS** |

Ibarra, 16 de julio de 2023

**CERTIFICACIÓN DIRECTOR**

Por medio del presente yo MSc. Fernando Garrido, en mi calidad de director de Trabajo de Grado certifico que el Sr. Mario Andrés Salazar Anrango portador de la cedula de ciudadanía Nro. 1003938477, ha trabajado en el desarrollo del proyecto de grado denominado **“Desarrollo de un SIG web para la prediccion de la erosion hidrica de suelos utilizando sensores remotes y tecnicas de Machine Learning (ML) en la provincia de Imbabura.”** previo a la obtención del Título de Ingeniero en Software realizado con interés profesional y con total responsabilidad que certifico con honor de verdad.

Es todo en cuanto puedo certificar en honor a la verdad

Atentamente

----------------------------------------------------------------

**Director de Trabajo de Grado**  
MSc. Fernando Garrido

# DEDICATORIA

El presente trabajo de

.

Mario Andrés Salazar Anrango

# AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco

.

Mario Andrés Salazar Anrango

#### TABLA DE CONTENIDOS

[DEDICATORIA V](#_Toc149719091)

[AGRADECIMIENTO VI](#_Toc149719092)

[ÍNDICE DE FIGURAS X](#_Toc149719093)

[ÍNDICE DE TABLAS XI](#_Toc149719094)

[RESUMEN XII](#_Toc149719095)

[ABSTRACT XIII](#_Toc149719096)

[INTRODUCCIÓN 1](#_Toc149719097)

[Tema 1](#_Toc149719098)

[Antecedentes 1](#_Toc149719099)

[Situación actual 2](#_Toc149719100)

[Prospectiva 2](#_Toc149719101)

[Planteamiento del problema 2](#_Toc149719102)

[Objetivos 4](#_Toc149719103)

[Alcance 4](#_Toc149719104)

[Metodología 5](#_Toc149719105)

[Justificación 8](#_Toc149719106)

[CAPÍTULO I 10](#_Toc149719107)

[Marco teórico 10](#_Toc149719108)

[1.3.1.2 Aplicaciones en ciencias ambientales 42](#_Toc149719109)

[1.3.1.3 Algoritmos de ML en la erosión de suelos 42](#_Toc149719110)

[1.3.1.4 Selección y extracción de características a partir de imágenes multiespectrales 42](#_Toc149719111)

[1.3.1.5 Evaluación de modelos de ML para la predicción de erosión de suelos 42](#_Toc149719112)

[1.3.1.6 Validación de modelos de ML para la predicción de erosión de suelos 42](#_Toc149719113)

[1.3.2 Inteligencia de Ubicación 42](#_Toc149719114)

[1.3.2.1 Definición y conceptos 42](#_Toc149719115)

[1.3.2.2 Aplicaciones en la predicción de erosión de suelos 42](#_Toc149719116)

[1.3.2.3 Aplicaciones en el mapeo de erosión de suelos 42](#_Toc149719117)

[1.3.2.4 Importancia en el análisis geoespacial 42](#_Toc149719118)

[1.3.2.5 Integración de datos geoespaciales y datos espectrales en modelos de IU 42](#_Toc149719119)

[1.4 Imágenes multiespectrales de suelos, ArcGIS Online y sus aplicaciones 42](#_Toc149719120)

[1.4.1 Definición y conceptos 42](#_Toc149719121)

[1.4.2 Descripción y características 42](#_Toc149719122)

[1.4.3 Sistemas de Información Geográfica 42](#_Toc149719123)

[1.4.4 StoryMap 42](#_Toc149719124)

[1.4.5 Dashboard 42](#_Toc149719125)

[1.4.6 AppBuilder 42](#_Toc149719126)

[1.4.7 Usos y aplicaciones 42](#_Toc149719127)

[CAPÍTULO II 42](#_Toc149719128)

[Desarrollo 43](#_Toc149719129)

[2.1 Metodología Cross Industry Standard Process for Data Mining (CRISP-DM) 43](#_Toc149719130)

[2.1.1 Hola 43](#_Toc149719131)

[2.1.2 Hola 2 43](#_Toc149719132)

[2.2 Especificaciones funcionales y de requerimientos 43](#_Toc149719133)

[2.3 Diseño conceptual 43](#_Toc149719134)

[2.4 Implementación, pruebas y mantenimiento 43](#_Toc149719135)

[CAPÍTULO III 43](#_Toc149719136)

[Resultados 43](#_Toc149719137)

[3.1 Análisis de resultados 43](#_Toc149719138)

[3.1.1 Hola 1 43](#_Toc149719139)

[3.1.2 Hola 2 43](#_Toc149719140)

[3.2 Interpretación de resultados 43](#_Toc149719141)

[3.3 Pruebas de funcionamiento 43](#_Toc149719142)

[3.4 Evaluación e impactos de resultados 43](#_Toc149719143)

[CONCLUSIONES 43](#_Toc149719144)

[RECOMENDACIONES 43](#_Toc149719145)

[BIBLIOGRAFÍA 43](#_Toc149719146)

[ANEXOS 45](#_Toc149719147)

# ÍNDICE DE FIGURAS

[Fig. 1 Diagrama de Vester 12](#_Toc120269025)

[Fig. 2 Gráfica de representación del alcance del proyecto. 13](#_Toc120269026)

[Fig. 3 Gráfico de representación de la metodología del proyecto. 15](#_Toc120269027)

[Fig. 4 Ciclo de Deming 21](#_Toc120269028)

[Fig. 5 Pilares de la seguridad de información 25](#_Toc120269029)

[Fig. 6 Esquema del primer dominio de la ISO 27002:2013 30](#_Toc120269030)

[Fig. 7 Esquema del segundo dominio de la ISO 27002:2013. 30](#_Toc120269031)

[Fig. 8 Esquema de tercer dominio de la ISO 27002:2013 31](#_Toc120269032)

[Fig. 9 Esquema de cuarto dominio de la ISO 27002:2013 31](#_Toc120269033)

[Fig. 10 Esquema de quinto dominio de la ISO 27002:2013 32](#_Toc120269034)

[Fig. 11 Esquema de sexto dominio de la ISO 27002:2013 33](#_Toc120269035)

[Fig. 12 Esquema de séptimo dominio de la ISO 27002:2013 34](#_Toc120269036)

[Fig. 13 Esquema de octavo dominio de la ISO 27002:2013 35](#_Toc120269037)

[Fig. 14 Esquema de noveno dominio de la ISO 27002:2013 36](#_Toc120269038)

[Fig. 15 Esquema de decimo dominio de la ISO 27002:2013 37](#_Toc120269039)

[Fig. 16 Esquema de onceavo dominio de la ISO 27002:2013 38](#_Toc120269040)

[Fig. 17 Esquema de doceavo dominio de la ISO 27002:2013 39](#_Toc120269041)

[Fig. 18 Esquema de treceavo dominio de la ISO 27002:2013 40](#_Toc120269042)

[Fig. 19 Esquema de catorceavo dominio de la ISO 27002:2013 41](#_Toc120269043)

# ÍNDICE DE TABLAS

[Tabla 1:Detalle de cada uno de los estándares que están incluidos en la ISO 27000 25](#_Toc133387484)

[Tabla 2: Dominios y controles 27](#_Toc133387485)

[Tabla 3 Características 40](#_Toc133387486)

# RESUMEN

Escribir el resumen del trabajo de grado en el siguiente espacio, es un texto breve y preciso que sintetiza los aspectos centrales del texto de una tesis, el cual es el primer apartado del Trabajo de Grado y por lo tanto la primera parte que leen los lectores.

**Palabras Claves:** sensores remotos …

# ABSTRACT

Here, you should write the grade work resume, it is a fast text where you …

**Keywords:** remote sensing …

# INTRODUCCIÓN

# Tema

Desarrollo de un SIG web para la predicción de la erosión hídrica de suelos utilizando sensores remotos y técnicas de *Machine Learning* (ML) en la provincia de Imbabura.

# Antecedentes

En la provincia de Imbabura la comercialización de los productos agrícolas es muy importante en distintas comunidades, por ende, se hace uso de los suelos para la labranza o cultivo de varios tipos de vegetación. Para mejorar los ingresos económicos con una mayor producción agrícola la sociedad no toma en cuenta la degradación de los suelos mediante la erosión hídrica, se hace uso de químicos, fertilizantes, herbicidas, pesticidas, entre otros; haciendo que se aumente la pérdida de minerales de los suelos y acelerando la erosión, además existen más factores que no se toman en cuenta la degradación de los suelos como: la tala de los bosques, incendios forestales, malas prácticas de labranza, malas prácticas de riego en los cultivos. Estos factores afectan gradualmente en la erosión del suelo, poniendo a riesgos como a desastres naturales, pérdidas de producción agrícola, pérdida de la biodiversidad y protección del ecosistema.

Una problemática existente es en las cuencas hidrográficas de la región costera ecuatoriana con la reducción de la producción agrícola, disminución de calidad del agua debido a la degradación y perdida de recurso del suelo, es por esto establecer mecanismos sostenibles para el medio ambiente que ayuden en la protección y cuidado, a reducir la contaminación y degradación de suelos, cuidar los bosques y fuentes de aguas. El empleo de Tecnologías de Información Geográfica permite acceder a datos de la precipitación y calcular el factor R de la Ecuación Universal de Perdida del Suelo (USLE); la topografía para la creación de mapas de pendientes a partir del Modelo de elevación Digital, la cobertura vegetal mediante la aplicación del índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y la capacidad de infiltración del suelo para determinar el riesgo de erosión mediante el potencial del software de diseño de Sistemas de Información Geográfica (SIG) (Pacheco et al., 2019).

Para mitigar la degradación del suelo, el uso de tecnologías de teledetección, el análisis de datos espaciales y técnicas de Machine Learning (ML) es fundamental según la revista Remote Sensing, en el cual realiza la comparación de tres algoritmos de aprendizaje automático: Support Vector Machine (SVM), Random Forest (RF) y Multilayer Perceptron (MLP). Para la automatización del proceso con el objetivo de predecir la erosión del suelo utilizaron datos a partir de las imágenes proporcionadas por Sentinel-2 obteniendo como conclusión que los modelos RF y SVM son los más precisos para la predicción, además recalcan como los métodos basados en teledetección satelital y distintas tecnologías avanzadas son de gran importancia para abordar desafíos ambientales en diferentes áreas (Fernández et al., 2023).

Uno de los modelos mas utilizados para la predicción de erosión de suelos es la Ecuación Universal RUSLE, el cual tiene en cuenta los factores: erosividad de la lluvia, susceptibilidad de erosión del suelo, largo de la pendiente, magnitud de la pendiente, cubierta, manejo de cultivos y residuos, prácticas de conservación para la estimación de la perdida de suelos promedio por un periodo de tiempo. El modelo RUSLE, las técnicas geoespaciales, los Sistemas de Información Geográfica (SIG), teledetección basados en tres bases de datos como: climáticos, de cultivos, y de suelos, pueden mejorar significativamente la precisión de la evaluación de la erosión del suelo (Almouctar et al., 2021a).

# Situación actual

# Prospectiva

# Planteamiento del problema

La erosión del suelo es un problema global que afecta a diferentes regiones del mundo, representando una amenaza para la conservación de los ecosistemas agrícolas a nivel mundial. En la actualidad, la degradación del suelo abarca alrededor de 1900 millones de hectáreas, lo que equivale al 65% de los recursos edáficos del planeta. La principal causa de esta degradación es la erosión del suelo, responsable del 85% de su deterioro. Se estima que se pierden aproximadamente 36,000 millones de toneladas de suelo fértil anualmente, lo que resulta en pérdidas económicas estimadas en 400,000 millones de dólares debido a la erosión del suelo, según datos de la FAO (Organismo Internacional de Energía Atómica, 2023).

En América Latina, la erosión del suelo afecta al 23% de las tierras con potencial para la agricultura, al 12% de los suelos ya cultivados y al 46% de los bosques tropicales. A pesar de tener uno de tener uno de los mejores recursos naturales a nivel mundial, América Latina solo alberga al 8% de la población (Naciones Unidas, 2015).

En ecuador, la erosión del suelo se observa principalmente en las cuencas hidrográficas de la región de la sierra, además, los datos estadísticos muestran que 40000 hectáreas de suelo arable presentan una erosión crítica, los valores más altos de erosión son del 90 a 95% en la provincia de Zamora. Los efectos de la erosión hídrica del suelo incluyen la pérdida de biodiversidad, la disminución de la productividad agrícola y el riesgo de inundaciones graves. Es importante destacar que esto se debe también a la eliminación de bosques, cobertura vegetal nativa, practicas inadecuadas en la producción agrícola (Paredes, 2018).

En la provincia de Imbabura, se presentan principalmente problemas derivados del incorrecto uso de los suelos por parte de los agricultores. Estos usos inadecuados abarcan diversas prácticas, como la sobreutilización de las tierras, el cultivo de un solo tipo de planta, la deforestación en las cuencas hidrográficas, el uso excesivo de químicos y fertilizantes, la labranza de los suelos en la misma dirección de la pendiente, los incendios forestales y las técnicas de riego inadecuadas, entre otros. La persistencia de estas malas prácticas agrícolas es una de las causas más preocupantes de la degradación del suelo y la perdida gradual de la productividad agrícola en la provincia (Quiñónez, 2022).

En la Figura 1 se puede observar el árbol de problemas de la erosión hídrica de suelos:

A diagram with text and images

Description automatically generated

Figura. 1 Árbol de problemas de la erosión hídrica de suelos

# Objetivos

**Objetivo General**

Realizar un *Sistema de información Geográfica* (SIG) web que utilice imágenes espectrales obtenidas a través de la API de Sentinel Hub de la *Agencia Espacial Europea* (ESA), con el objetivo de predecir la erosión del suelo en la provincia de Imbabura.

Servicios generales

Inge. Buenas tardes

A continuación, le redacte más o menos el tema, no cuál es su opinión Inge, con todo ya le escribí a un ingeniero para que me ayude o me recomiende a quien me puede recomendar para que me guie.

**Tema:**

Desarrollar un sistema de control y seguimiento del proceso de control interno de compras públicas de la empresa Airmax Telecom Soluciones Tecnológicas S.A. aplicando Practicas de Codificación Segura OWASP (*Open Web Application Security Project*) Top ten.

**Objetivo General**

Desarrollar un sistema de control y seguimiento del proceso de control interno de compras públicas para la empresa Airmax Telecom Soluciones Tecnológicas S.A., aplicando las mejores prácticas de seguridad de la OWASP para garantizar la integridad, confidencialidad y disponibilidad de la información.

**Objetivos Específicos**

* Realizar una investigación descriptiva de los procesos de compras públicas y las Practicas de Codificación Segura OWASP Top Ten.
* Diseñar e implementar un sistema seguro de protección de datos, basado en las Practicas de Codificación Segura OWASP Top Ten, asegurando la protección contra Inyecciones SQL y uso de mecanismos de protección y cifrado de información.
* Evaluar la efectividad del sistema de control y seguimiento, verificando que las medidas de seguridad, autenticación, protección contra vulnerabilidades y cifrado cumplan con los estándares de OWASP, y validando su impacto en la reducción de riesgos y en la protección de los datos sensibles.

Me podría ayudar con su opinión, si debo de aplicar alguna ISO o ahí estaría bien, o si también si Ud. pudiese ser mi tutor a quien me recomienda que este relacionado mas o menos con este tema,

De antemano muchas gracias, Inge por su ayuda.

# Alcance

El objetivo principal de este proyecto es predecir la erosión hídrica del suelo, y para lograrlo se desarrollará un SIG web. Este sistema permitirá detectar y predecir la erosión del suelo en la provincia de Imbabura, que brindará a la población la capacidad de tomar decisiones de manera más rápida en lo que respecta a la protección y cuidado preventivo del suelo. Algunas de las medidas que se pueden tomar incluyen la implementación de buenas prácticas agrícolas, la reducción del uso de fertilizantes y productos químicos, el apoyo económico para adquirir equipos tecnológicos que ayuden a prevenir la erosión del suelo, entre otras.

Para llevar a cabo este proyecto, se realizará un análisis de datos utilizando imágenes multiespectrales de alta resolución proporcionados por los satélites Sentinel-2. Estas imágenes serán procesadas y utilizadas para entrenar un modelo de *Machine Learning* (ML).

En el desarrollo del SIG web se utilizará herramientas que se presentan en la Figura 2.

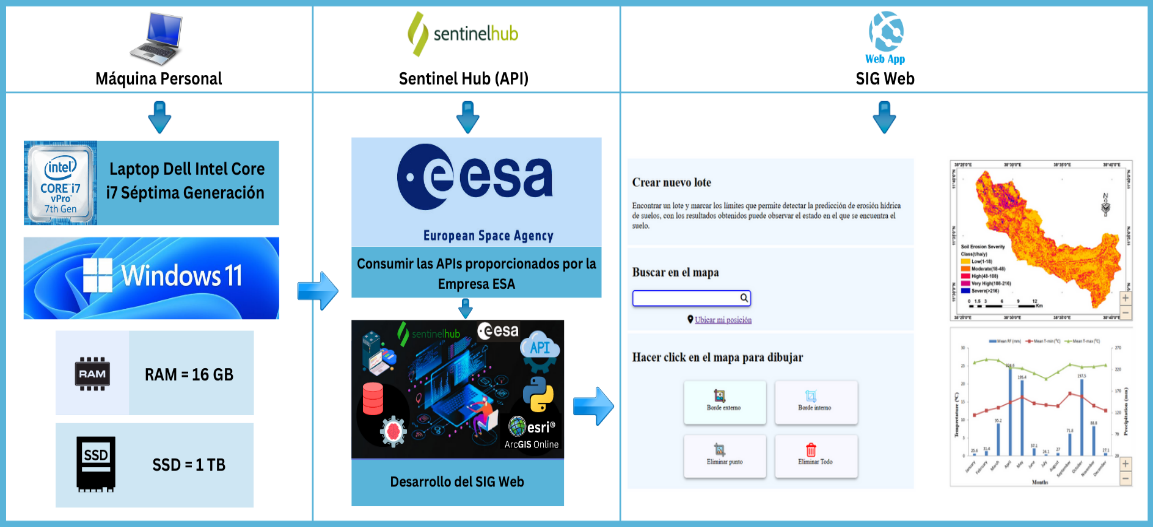


Figura. 2 Esquema del alcance del proyecto

# Metodología

En el desarrollo de este proyecto se utilizarán diferentes tipologías de investigación. La investigación documental se empleará para recopilar información y datos, como las imágenes multiespectrales proporcionados por Sentinel Hub de la *Agencia Espacial Europea* (ESA). Se llevará a cabo una investigación descriptiva para realizar un estudio detallado de las características y condiciones actuales de la erosión hídrica del suelo en la provincia. Asimismo, se empleará una investigación cuantitativa para procesar los datos recopilados y entrenar los modelos predictivos de erosión hídrica del suelo mediante algoritmos de *Machine Learning* (ML). Por último, se realizará una investigación aplicada para presentar los resultados a través de un SIG web (Díaz-Narváez & Núñez, 2016).

Para cumplir con el primer objetivo, se llevará a cabo un estudio y revisión sobre las técnicas de erosión hídrica, así como el uso de la teledetección satelital. La metodología utilizada será la *Revisión Sistemática de Literatura* (SLR) para recopilar información, analizar y describir múltiples trabajos de investigación de manera sistemática.

En relación con el segundo objetivo, se utilizarán los datos de imágenes multiespectrales de la ESA para entrenar un modelo de *Machine Learning* (ML) e *Inteligencia de Ubicación* (IU), utilizando una *Red Neuronal Convolucional* (*Convolutional Neural Network*, CNN). El propósito es realizar predicciones de la erosión hídrica del suelo en la provincia de Imbabura.

Para alcanzar el tercer objetivo, se desarrollara un SIG web utilizando la metodología *Cross Industry Standard Process for Data Mining* (CRISP-DM), esta metodología cumple un ciclo de vida que comprende de fases orientado a la ciencia de datos desde la comprensión del negocio o entendimiento de los objetivos y requisitos, entendimiento de los datos para identificar, recopilar y analizar la información, preparación y organización de los datos, modelado o técnicas aplicadas para el mejoramiento, evaluación e implementación (Data Science Process Alliance, 2023). Esta aplicación permitirá visualizar los resultados obtenidos a través de un StoryMap, Dashboard o AppBuilder de ArcGIS online. Además, se aplicarán técnicas de estadística inferencial para presentar graficas de las predicciones.

En la Figura 3 se puede observar la metodología *Cross Industry Standard Process for Data Mining* CRISP-DM.



Figura. 3 Metodología CRISP-DM (Data Science Process Alliance, 2023).

Para lograr el cuarto objetivo, en la visualización del SIG web se presentará los posibles impactos en la provincia, para la mitigación de estos impactos se mostrará diferentes estrategias de conservación y manejo del suelo, estas presentaciones se realizarán mediante los resultados de la predicción de erosión hídrica de suelos aplicadas con las técnicas de *Machine Learning* (ML).

En la figura 4 se presenta el esquema de la metodología de investigación de cada uno de los objetivos.

A diagram of a diagram

Description automatically generated

Figura. 4 Esquema de la metodología de investigación

# Justificación

El presente proyecto tiene como objetivo desarrollar un SIG (*Sistema de Información Geográfica*) web para predecir la erosión hídrica del suelo, con el fin de obtener resultados estadísticos en la provincia de Imbabura y fortalecer la toma de decisiones en el marco del *Objetivo de Desarrollo Sostenible* (ODS) numero 15. Este objetivo busca proteger, restaurar y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, gestionar de manera sostenible los bosques, combatir la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras y detener la perdida de la biodiversidad (Naciones Unidas, 2022).

En particular, el proyecto se enfoca en la meta 15.3 del ODS, que busca combatir la desertificación, rehabilitar las tierras y los suelos degradados, incluyendo aquellas afectadas por la desertificación, la sequía y las inundaciones, y lograr un mundo con una degradación neutral de las tierras para el año 2030 (Naciones Unidas, 2018).

El SIG web desarrollado, basado en técnicas de *Machine Learning* (ML), contribuirá a la toma de decisiones de los agricultores y la población en general, con el propósito de mitigar la rápida degradación del suelo y prevenir deslizamientos de tierra, inundaciones y otros desastres naturales. Mediante el uso del SIG web, se podrán establecer nuevos planes estratégicos para combatir la erosión hídrica del suelo.

**Justificación Tecnológica**

La utilización de sensores remotos (teledetección) satelitales y los *Sistemas de Información Geográfica* (SIG) *o Geographic Information System* (GIS) por sus siglas en inglés, proveen datos e información valiosa a partir de imágenes multiespectrales. Mediante el empleo de técnicas de *Machine Learning* (ML) se logra obtener una mayor precisión en la predicción de la erosión hídrica del suelo. Estas técnicas tienen la capacidad de aprender y adaptarse a los datos mediante el uso de *Redes Neuronales Convolucionales* (CNN), las cuales son capaces de procesar y analizar grandes conjuntos de datos, identificando patrones relacionados con la erosión hídrica y extrayendo características relevantes.

Al hacer uso de sensores remotos, técnicas del SIG y el modelo RUSLE, es posible realizar el análisis de cinco factores que contribuyen a combatir la erosión del suelo. Estos factores son: la erosividad de la lluvia (factor R), la erosión del suelo (factor K), la duración e inclinación de la pendiente (factor LS), la gestión de la cubierta terrestre (factor C) y las prácticas de protección y conservación del suelo (factor P). el estudio de estos factores permite estimar la pérdida del suelo promedio (factor A), ver ecuación (1) (Almouctar et al., 2021b). El uso de *Machine Learning* (ML) y SIG desempeña un papel crucial en la protección y conservación de la biodiversidad del ecosistema. Estas herramientas, junto con la programación en Python, facilita el desarrollo de las aplicaciones que contribuyen a una mejor planificación territorial y la protección de los recursos naturales.

(1)

**Justificación Ambiental**

El desarrollo del SIG web facilita la toma de decisiones en la planificación y conservación del ecosistema, con la finalidad de mitigar la erosión hídrica del suelo, preservar la biodiversidad y reducir los riesgos de desastres naturales.

**Justificación Social**

El desarrollo del SIG web brindara a los agricultores la oportunidad de conocer el estado de erosión del suelo en el que se encuentran. Esto les permitirá mejorar las técnicas de producción agrícola, reduciendo el daño causado a los suelos. Al conocer el nivel de erosión, podrán tomar medidas como disminuir el uso de químicos y fertilizantes, así como implementar nuevas técnicas de riego y labranza en sus cultivos.

# CAPÍTULO I

# Marco teórico

* 1. **Erosión hídrica de suelos**

La erosión hídrica de suelos es un fenómeno natural que ocurre debido a la acción del agua en la superficie terrestre, un proceso que puede ser tanto beneficioso como perjudicial para el medio ambiente y la sociedad. Esta forma de erosión puede tener impactos significativos en la calidad del suelo, la fertilidad de las tierras agrícolas y la salud de los ecosistemas acuáticos.

Existen diferentes factores que influyen en la erosión hídrica, como la topografía, el uso del suelo, la intensidad de las precipitaciones y la cobertura vegetal y tiene consecuencias tanto a nivel local como regional, y afectan la sostenibilidad del medio ambiente y la disponibilidad de recursos naturales.

* + 1. **Definición y conceptos clave**

**Erosión:** Es la acción de desgaste y transporte de materiales de la superficie terrestre por fuerzas naturales como el agua, el viento o el hielo.

**Escorrentía:** Es el flujo de agua que se produce sobre la superficie del suelo debido a la lluvia, el deshielo o el riego excesivo. La escorrentía puede generar erosión al arrastrar partículas de suelo.

**Sedimentación:** Es el proceso por el cual las partículas de suelo erosionadas son depositadas en otros lugares debido a la pérdida de velocidad del agua, como en ríos, embalses o áreas bajas.

**Parcelas de erosión:** Son áreas experimentales o de estudio donde se monitorea el proceso de erosión hídrica para evaluar su magnitud y efectos.

**Factores que influyen:** Diversos factores pueden influir en la erosión hídrica de suelos, como la intensidad de las lluvias, la pendiente del terreno, la cobertura vegetal, la textura del suelo y las prácticas de manejo agrícola.

**Consecuencias:** La erosión hídrica de suelos puede llevar a la pérdida de fertilidad del suelo, reducción de la capacidad de retención de agua, degradación del hábitat para la vida silvestre, contaminación de cuerpos de agua y aumento del riesgo de inundaciones.

**Control y prevención:** Se implementan prácticas de conservación del suelo, como terrazas, barreras vivas, siembra directa y rotación de cultivos, para mitigar la erosión y proteger la calidad del suelo.

**Sedimentos en suspensión:** Son partículas de suelo transportadas por el agua en suspensión, lo que puede afectar la calidad del agua y la vida acuática.

* + 1. **Precipitación y escorrentía superficial**

La precipitación y la escorrentía superficial son dos procesos hidrológicos interconectados que juegan un papel fundamental en el ciclo del agua y la dinámica de los suelos. Estos fenómenos están estrechamente relacionados con la disponibilidad de agua, la erosión del suelo y la regulación de los ecosistemas acuáticos. Comprender su definición y tipos es esencial para abordar cuestiones relacionadas con la gestión del agua y la conservación del suelo.

**Definición y tipos**

La precipitación es el fenómeno natural mediante el cual el agua en forma de lluvia, nieve, granizo o llovizna cae de la atmósfera y llega a la superficie terrestre. Es una parte crucial del ciclo hidrológico, ya que suministra agua a los ecosistemas terrestres y acuáticos, recargando fuentes de agua dulce como ríos, lagos y acuíferos. La cantidad, frecuencia y distribución de la precipitación pueden variar según la ubicación geográfica y las estaciones del año.

**Tipos de precipitación**

**Lluvia:** Es el tipo más común de precipitación, en forma de gotas de agua líquida que caen de las nubes cuando las condiciones atmosféricas son favorables.

**Nieve:** Se forma cuando las temperaturas son lo suficientemente bajas para congelar las gotas de agua en la atmósfera, dando como resultado copos de nieve que se acumulan en la superficie terrestre.

**Granizo:** Son bolas de hielo de mayor tamaño que se forman en nubes con fuertes corrientes ascendentes que mantienen los cristales de hielo en la atmósfera y los recubren con capas de agua congelada.

**Llovizna:** Es una precipitación muy ligera, similar a una ligerísima lluvia, que se produce cuando las gotas de agua son muy pequeñas.

**Escorrentía superficial**

La escorrentía superficial es el flujo de agua que se desplaza sobre la superficie del suelo debido a que la precipitación excede la capacidad de absorción y retención del terreno. Cuando el suelo está saturado o impermeable, el agua no puede infiltrarse y se desplaza en la superficie, recogiendo sedimentos y nutrientes en su camino. La escorrentía superficial puede ocurrir en diversas escalas, desde pequeñas corrientes y arroyos hasta ríos más grandes, y puede desempeñar un papel importante en la erosión del suelo y el transporte de sedimentos hacia cuerpos de agua.

**Tipos de escorrentía superficial**

**Escorrentía directa:** Ocurre cuando la precipitación fluye directamente sobre la superficie sin infiltrarse en el suelo.

**Escorrentía superficial concentrada:** Es cuando la escorrentía se canaliza en corrientes más definidas, formando pequeños arroyos o riachuelos.

**Escorrentía superficial difusa:** Se produce cuando la escorrentía se dispersa sobre una amplia área, creando un flujo más generalizado sin canales claramente definidos.

El estudio y comprensión de la precipitación y la escorrentía superficial son esenciales para la gestión adecuada del agua y la protección del suelo, especialmente en áreas propensas a la erosión y la degradación ambiental. Estos procesos influyen en la disponibilidad de agua, la fertilidad del suelo y la conservación de los recursos naturales en nuestro entorno.

* + 1. **Factores que influyen en la erosión hídrica**

La erosión hídrica es un proceso complejo influenciado por una variedad de factores naturales y humanos. A continuación, te presento algunos de los principales factores que influyen en la erosión hídrica de suelos:

**Precipitación:** La intensidad y la cantidad de precipitación son factores cruciales en la erosión hídrica. Las lluvias intensas pueden generar mayor escurrimiento superficial y, por lo tanto, aumentar la velocidad y la cantidad de erosión en una región.

**Topografía:** La pendiente del terreno es un factor importante. En terrenos con pendientes pronunciadas, el agua tiende a moverse más rápidamente, lo que incrementa la erosión. Las áreas con relieve plano o con pendientes suaves permiten que el agua se infiltre y se retenga más fácilmente, disminuyendo la erosión.

**Tipo de suelo:** La composición y la estructura del suelo también influyen en su susceptibilidad a la erosión hídrica. Suelos más compactos, con menor contenido de materia orgánica y menos cobertura vegetal, son más propensos a ser arrastrados por el agua.

**Cobertura vegetal:** La vegetación cumple un papel crucial en la protección contra la erosión hídrica. Las raíces de las plantas ayudan a mantener la cohesión del suelo, reduciendo la posibilidad de que sea arrastrado. Asimismo, la cobertura vegetal actúa como una barrera que intercepta la energía del agua de lluvia, reduciendo su impacto sobre la superficie del suelo.

**Uso del suelo:** La actividad humana puede alterar significativamente la erosión hídrica. La deforestación, la agricultura intensiva, la urbanización y la construcción de carreteras pueden aumentar la exposición del suelo a la erosión, especialmente si no se aplican prácticas de manejo sostenible.

**Prácticas de manejo agrícola:** Las prácticas agrícolas, como la labranza intensiva, el monocultivo y el uso excesivo de fertilizantes y pesticidas, pueden reducir la capacidad del suelo para resistir la erosión hídrica.

**Sistemas** **de drenaje**: La construcción de sistemas de drenaje inapropiados puede acelerar la velocidad del flujo de agua y aumentar la erosión.

**Erosión previa:** La erosión hídrica anterior puede dejar el suelo más vulnerable a nuevos eventos de erosión, ya que puede haber reducido su capa superficial de protección.

Estos factores interactúan de manera compleja, y la combinación de varios de ellos en una determinada área puede aumentar la susceptibilidad a la erosión hídrica. Para gestionar adecuadamente la erosión hídrica y sus impactos, es esencial considerar estos factores y aplicar prácticas de conservación y manejo sostenible del suelo y los recursos hídricos.

* + 1. **Métodos de medición de erosión hídrica**

Existen varios métodos para medir la erosión hídrica en suelos, que van desde técnicas de campo hasta enfoques basados en tecnología y modelos computacionales. A continuación, te presento algunos de los métodos más comunes utilizados para medir la erosión hídrica:

**Parcelas de escorrentía o escala de campo:** Este método implica establecer parcelas experimentales en el campo donde se mide directamente la cantidad de sedimento transportado por el agua de escorrentía durante eventos de lluvia. Las parcelas pueden ser pequeñas o grandes, y generalmente están equipadas con colectores para capturar el sedimento arrastrado.

**Erosión en surcos y cárcavas:** Se centra en la medición de la erosión en surcos y cárcavas generados por el flujo de agua concentrado en áreas inclinadas. Se miden las dimensiones de los surcos y la cantidad de sedimento acumulado en ellos.

**Tecnologías de teledetección:** El uso de imágenes satelitales y drones permite evaluar cambios en el paisaje y la superficie del suelo a lo largo del tiempo. Estas tecnologías pueden proporcionar una visión general de la erosión hídrica a gran escala y ayudar a identificar áreas propensas a la erosión.

**Sistemas de monitoreo de flujo de agua:** Utilizan sensores y equipos para medir el caudal y la velocidad del agua en arroyos y ríos. Al combinar estos datos con mediciones de la concentración de sedimentos, es posible estimar la cantidad total de sedimentos transportados.

**Modelos de erosión:** Se utilizan modelos computacionales para simular procesos de erosión hídrica en función de los datos de entrada, como precipitación, topografía, tipo de suelo, cobertura vegetal y prácticas de manejo. Estos modelos pueden proporcionar estimaciones de erosión a largo plazo y ayudar en la planificación y toma de decisiones.

**Tecnologías de trazadores:** Se emplean trazadores, como el uso de partículas con colorantes, para seguir el movimiento del agua y el sedimento durante eventos de lluvia. Estos trazadores permiten entender los patrones de transporte y erosión en el paisaje.

**Sistemas de monitoreo automatizado:** Utilizan tecnologías avanzadas para medir la escorrentía, la erosión y la sedimentación en tiempo real. Estos sistemas pueden incluir sensores, estaciones meteorológicas y equipos de monitoreo remoto.

Es importante tener en cuenta que cada método tiene sus ventajas y limitaciones, y la elección del método dependerá de la escala y los objetivos específicos de la investigación o el monitoreo. Combinar múltiples métodos puede proporcionar una visión más completa y precisa de la erosión hídrica en un área determinada. Además, la tecnología sigue evolucionando, lo que permite mejorar la precisión y eficiencia de las mediciones en el estudio de este fenómeno natural.

* + 1. **Practicas agrícola, cambio climático y deforestación**

La erosión hídrica de suelos es un problema ambiental complejo que puede estar influenciado significativamente por las prácticas agrícolas, el cambio climático y la deforestación. A continuación, veremos cómo estos factores interactúan y contribuyen a la erosión hídrica:

**Prácticas agrícolas:** Las prácticas agrícolas intensivas, como el arado excesivo, la falta de cobertura vegetal y la sobreexplotación del suelo, pueden aumentar la vulnerabilidad del suelo a la erosión hídrica. Cuando se remueve la vegetación natural para dar paso a la agricultura, se pierde la protección natural que las raíces de las plantas proporcionan al suelo. Además, la maquinaria pesada utilizada en la agricultura intensiva puede compactar el suelo, reduciendo su capacidad de absorber agua y aumentando el escurrimiento superficial.

**Cambio climático:** El cambio climático puede agravar la erosión hídrica debido a los cambios en los patrones de precipitación y la frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos, como lluvias torrenciales. Estos cambios pueden incrementar la cantidad de agua que se desplaza sobre la superficie del suelo, aumentando la erosión. También puede haber períodos de sequía prolongados, lo que lleva a la pérdida de la cubierta vegetal y una mayor exposición del suelo a la erosión.

**Deforestación:** La deforestación, que implica la eliminación de la cubierta arbórea y vegetal, es un factor clave en la erosión hídrica. Los bosques actúan como amortiguadores naturales, interceptando y absorbiendo el agua de lluvia. Sin la protección de la vegetación, la escorrentía aumenta y el suelo queda expuesto al impacto directo de las gotas de lluvia, lo que favorece la erosión.

Las prácticas agrícolas, el cambio climático y la deforestación están estrechamente interconectados y pueden formar un ciclo vicioso que exacerba la erosión hídrica:

* La deforestación para la expansión agrícola aumenta la exposición del suelo a la erosión hídrica.
* Las prácticas agrícolas intensivas, como la labranza excesiva y la falta de cobertura vegetal, empeoran la erosión hídrica.
* El cambio climático puede intensificar los eventos de lluvia, aumentando el escurrimiento superficial y, por ende, la erosión hídrica.

Como resultado de este ciclo, se puede producir una pérdida significativa de suelo fértil, una reducción en la calidad del agua y la degradación general del ecosistema.

Para abordar la erosión hídrica de suelos relacionada con las prácticas agrícolas, el cambio climático y la deforestación, es esencial adoptar prácticas de manejo sostenible del suelo y de conservación que promuevan la retención de la humedad, la cobertura vegetal y la reducción de la escorrentía superficial. La reforestación y la restauración de ecosistemas también juegan un papel fundamental para proteger los suelos y mitigar la erosión hídrica. Además, es necesario tomar medidas a nivel global para abordar el cambio climático y reducir la deforestación, lo que contribuirá a un enfoque integral para proteger nuestros recursos naturales y fomentar la sostenibilidad agrícola.

* + 1. **Monitoreo de la erosión hídrica**

El monitoreo de la erosión hídrica es una práctica fundamental para entender y evaluar los procesos de degradación del suelo causados por el impacto del agua en la superficie terrestre. La erosión hídrica es un fenómeno natural que puede resultar beneficioso en algunos casos, pero puede tener graves consecuencias cuando ocurre de manera acelerada y descontrolada debido a actividades humanas o cambios ambientales. Es por eso que el monitoreo de la erosión hídrica es esencial para el manejo sostenible del suelo y los recursos naturales, así como para la conservación del medio ambiente.

**Erosión hídrica:** Se refiere al proceso de desprendimiento, transporte y deposición de partículas de suelo causado por la acción del agua, ya sea en forma de lluvia o escorrentía superficial. Esta erosión puede ocurrir tanto en áreas agrícolas como en zonas naturales, y sus consecuencias pueden incluir la pérdida de suelo fértil, la degradación de tierras agrícolas y la contaminación de cuerpos de agua.

**Monitoreo:** El monitoreo es el proceso de recolección sistemática y continua de datos para evaluar cambios y tendencias en un fenómeno específico a lo largo del tiempo. En el caso del monitoreo de la erosión hídrica, implica medir y registrar parámetros relevantes para entender la magnitud y la velocidad de la erosión en un área determinada.

**Parámetros de monitoreo**: Los parámetros de monitoreo utilizados en la medición de la erosión hídrica incluyen la cantidad de sedimento transportado por el agua, la velocidad y el caudal del flujo, la concentración de sedimentos, la profundidad de erosión en el suelo y la pérdida de suelo por unidad de área.

**Técnicas de monitoreo:** Existen diversas técnicas y métodos para monitorear la erosión hídrica, que pueden variar desde técnicas de campo hasta enfoques basados en tecnología y modelos computacionales. Algunas de estas técnicas incluyen el uso de parcelas de escorrentía, análisis de imágenes satelitales y drones, sistemas de medición de caudal y velocidades de flujo de agua, y el uso de modelos de erosión basados en Machine Learning, entre otros.

Importancia del monitoreo: El monitoreo de la erosión hídrica proporciona datos fundamentales para la toma de decisiones informadas en la gestión de recursos naturales y la planificación territorial. Ayuda a identificar áreas vulnerables a la erosión, evaluar la efectividad de prácticas de conservación y manejo del suelo, y detectar cambios en los patrones de erosión a lo largo del tiempo.

En resumen, el monitoreo de la erosión hídrica es una herramienta esencial para comprender y abordar este fenómeno ambiental. Al proporcionar datos cuantitativos y cualitativos, permite tomar medidas preventivas y correctivas para preservar la calidad del suelo, proteger los recursos hídricos y mantener la salud de los ecosistemas

* 1. **Teledetección satelital, tipos, usos y aplicaciones**

La teledetección satelital es una técnica que utiliza imágenes y datos recopilados desde satélites en órbita alrededor de la Tierra para obtener información sobre la superficie terrestre y los fenómenos que ocurren en ella. Estas imágenes se capturan en diferentes longitudes de onda, lo que permite obtener una amplia variedad de datos sobre el terreno y los cambios que se producen en la superficie terrestre. A continuación, exploraremos los tipos, usos y aplicaciones más comunes de la teledetección satelital:

**Tipos de teledetección satelital**

**Teledetección óptica:** Utiliza sensores que capturan la luz visible y la luz infrarroja cercana para obtener imágenes y datos sobre la vegetación, cuerpos de agua, áreas urbanas y cambios en la cobertura terrestre.

**Teledetección de microondas:** Emplea sensores que trabajan en longitudes de onda de microondas para penetrar las nubes y obtener información sobre el contenido de humedad del suelo y la topografía.

**Teledetección térmica:** Se basa en sensores que miden la radiación térmica emitida por la superficie terrestre, permitiendo obtener datos sobre la temperatura de la superficie y las variaciones térmicas.

**Usos y aplicaciones de la teledetección satelital**

**Monitoreo ambiental:** La teledetección satelital se utiliza para monitorear cambios en la cobertura de bosques, la deforestación, la desertificación, la expansión urbana y la calidad del agua, lo que ayuda a evaluar y proteger el medio ambiente.

**Agricultura y seguridad alimentaria:** Permite monitorear el crecimiento de cultivos, evaluar la salud de las plantaciones, detectar plagas y enfermedades, y realizar estimaciones de rendimiento agrícola.

**Gestión de recursos naturales:** Se utiliza para el monitoreo de recursos hídricos, la evaluación de la calidad del suelo, la detección de cambios en el uso del suelo y la planificación de la gestión de cuencas hidrográficas.

**Respuesta a desastres naturales:** La teledetección satelital es valiosa para obtener imágenes rápidas después de desastres naturales como terremotos, inundaciones o incendios forestales, lo que ayuda en la evaluación de daños y apoyo en las operaciones de rescate.

**Estudios climáticos:** La teledetección es fundamental para el seguimiento de patrones climáticos, la detección de eventos climáticos extremos y la medición de los cambios en los glaciares y el hielo marino.

**Cartografía y planificación territorial:** Se utiliza para la elaboración de mapas topográficos, cartografía de uso del suelo, evaluación de cambios en la infraestructura y planificación territorial.

**Investigación científica:** La teledetección satelital es esencial en diversas disciplinas científicas como la geología, la ecología, la oceanografía y la meteorología, proporcionando datos valiosos para la investigación y el avance del conocimiento.

La teledetección satelital ofrece una amplia gama de aplicaciones en la toma de decisiones, la gestión de recursos naturales y la comprensión de los cambios que ocurren en nuestro planeta. Con la constante mejora en la tecnología y el acceso a datos de múltiples fuentes, la teledetección satelital sigue siendo una herramienta poderosa para el estudio y monitoreo de la Tierra y sus procesos naturales.

* + 1. **Tipos de sensores remotos utilizados en la teledetección**

En la teledetección, los sensores remotos son dispositivos utilizados para capturar información sobre la superficie terrestre desde una distancia, generalmente desde plataformas en órbita como satélites o desde aviones. Estos sensores pueden operar en diferentes rangos del espectro electromagnético y capturar datos en diversas longitudes de onda. A continuación, se presentan algunos de los principales tipos de sensores remotos utilizados en la teledetección:

* + - 1. **Teledetección activa**

La teledetección activa es una técnica que implica enviar señales de energía electromagnética, como pulsos de luz láser o microondas, hacia la superficie terrestre y luego medir la energía reflejada o dispersada por los objetos y características del terreno. En el contexto de tu tesis sobre el desarrollo de un Sistema de Información Geográfica (SIG) web para la predicción de la erosión hídrica de suelos utilizando sensores remotos y técnicas de Machine Learning (ML) en la provincia de Imbabura, la teledetección activa puede tener aplicaciones valiosas y complementarias a la teledetección pasiva (utilizando sensores que capturan la radiación solar reflejada).

Algunas aplicaciones de la teledetección activa:

LIDAR para el modelado topográfico: El uso de LIDAR permitiría obtener datos precisos de la topografía del terreno, lo que es fundamental para la predicción de la erosión hídrica, ya que la pendiente del terreno es un factor clave que influye en el escurrimiento superficial.

Detección de cambios en la estructura del terreno: Con el LIDAR, se pueden detectar cambios en la estructura del terreno, como la erosión de cárcavas o surcos, lo que proporcionaría información relevante para la evaluación y monitoreo de la erosión hídrica.

Identificación de áreas vulnerables: La teledetección activa, en combinación con técnicas de ML, puede ayudar a identificar áreas susceptibles a la erosión hídrica en función de la topografía, la vegetación y otros factores.

Caracterización de la vegetación: Algunos sensores activos de microondas pueden proporcionar información sobre la estructura y la densidad de la vegetación, lo que es relevante para entender cómo la cubierta vegetal influye en la retención del suelo y la reducción de la erosión.

Es importante destacar que el uso de técnicas de Machine Learning en conjunto con la teledetección activa y pasiva puede mejorar la precisión y eficiencia en la predicción de la erosión hídrica. Los algoritmos de ML pueden aprovechar los datos recopilados por los sensores remotos para identificar patrones y tendencias en los factores que influyen en la erosión, lo que permite desarrollar modelos de predicción más robustos y precisos.

En resumen, la teledetección activa puede ser una herramienta valiosa para complementar la teledetección pasiva y enriquecer la información necesaria para la predicción de la erosión hídrica en tu tesis. La combinación de ambas técnicas, junto con el uso de Machine Learning, puede potenciar el desarrollo de un SIG web que brinde resultados más precisos y útiles para la gestión y conservación del suelo en la provincia de Imbabura.

* + - 1. **Teledetección pasiva**

La teledetección pasiva es una técnica que implica la captura de la radiación electromagnética emitida o reflejada por la superficie terrestre sin enviar energía adicional hacia ella. Esta técnica es relevante en el contexto de tu tesis sobre el desarrollo de un Sistema de Información Geográfica (SIG) web para la predicción de la erosión hídrica de suelos utilizando sensores remotos y técnicas de Machine Learning (ML) en la provincia de Imbabura. A continuación, mencionaré cómo la teledetección pasiva se relaciona con tu tema de investigación:

**Captura de datos ambientales:** La teledetección pasiva, mediante el uso de sensores remotos que capturan la radiación electromagnética reflejada por la superficie terrestre, puede proporcionar datos ambientales clave relacionados con la vegetación, la cobertura del suelo, la humedad y otros parámetros que influyen en la erosión hídrica. Estos datos son fundamentales para el desarrollo de modelos de predicción.

**Identificación de cambios en el uso del suelo:** La teledetección pasiva permite detectar cambios en el uso del suelo a lo largo del tiempo, lo que es esencial para evaluar el impacto de actividades humanas, como la expansión urbana o la deforestación, en la erosión hídrica.

**Evaluación de la vegetación:** La teledetección pasiva es especialmente útil para evaluar la salud y la densidad de la vegetación, lo que tiene un impacto significativo en la erosión hídrica, ya que la vegetación ayuda a retener el suelo y reducir la escorrentía superficial.

**Análisis de la erosión del suelo:** La teledetección pasiva puede utilizarse para analizar los patrones de erosión del suelo y detectar áreas vulnerables a la erosión hídrica en la provincia de Imbabura. La información obtenida puede ser útil para la planificación y toma de decisiones en la gestión de recursos naturales.

**Complemento del análisis de teledetección activa:** La teledetección pasiva puede complementar la teledetección activa, como el LIDAR, para obtener una visión más completa y detallada de la superficie terrestre y los factores que influyen en la erosión hídrica.

Al combinar la teledetección pasiva con técnicas de Machine Learning, es posible desarrollar modelos de predicción más precisos y confiables para la erosión hídrica en la provincia de Imbabura. El análisis de datos de teledetección pasiva con algoritmos de ML permitirá identificar patrones y relaciones complejas que influyen en la erosión, lo que mejorará la capacidad de predicción y gestión de la erosión hídrica en la región.

* + - 1. **Teledetección mediante microondas**

La teledetección mediante microondas es una técnica relevante y relacionada con tu tema de tesis sobre el desarrollo de un Sistema de Información Geográfica (SIG) web para la predicción de la erosión hídrica de suelos utilizando sensores remotos y técnicas de Machine Learning (ML) en la provincia de Imbabura. A continuación, se describen cómo la teledetección mediante microondas puede contribuir a tu investigación:

**Penetración de nubes y cobertura vegetal:** A diferencia de la teledetección óptica, los sensores de microondas pueden penetrar las nubes y la vegetación densa, lo que permite obtener datos sobre la superficie terrestre incluso en condiciones climáticas adversas.

**Medición de la humedad del suelo:** La teledetección mediante microondas puede proporcionar información sobre la humedad del suelo, lo cual es un factor clave en la erosión hídrica. La humedad del suelo influye en la capacidad del suelo para absorber y retener el agua, lo que afecta directamente la erosión.

**Detección de cambios en la estructura del terreno:** Los sensores de microondas pueden detectar cambios en la estructura del terreno, como la erosión de cárcavas o surcos, lo que es relevante para la evaluación y monitoreo de la erosión hídrica.

**Evaluación de la rugosidad del terreno:** Los datos de microondas pueden proporcionar información sobre la rugosidad del terreno, lo que influye en la escorrentía superficial y, por lo tanto, en la erosión.

**Identificación de áreas vulnerables:** La teledetección mediante microondas, combinada con técnicas de Machine Learning, puede ayudar a identificar áreas susceptibles a la erosión hídrica en función de la topografía, la humedad del suelo y otros factores.

**Complemento a otros tipos de sensores:** La teledetección mediante microondas puede complementar la teledetección óptica y otros tipos de sensores remotos, lo que permite obtener una visión más completa y detallada de la superficie terrestre y los factores que influyen en la erosión hídrica.

El uso de la teledetección mediante microondas junto con técnicas de Machine Learning puede mejorar significativamente la precisión y la capacidad de predicción de la erosión hídrica en la provincia de Imbabura. Los datos de microondas recopilados por los sensores remotos, combinados con algoritmos de ML, pueden ayudar a identificar patrones y relaciones complejas que influyen en la erosión, lo que contribuirá a una gestión más efectiva de la erosión hídrica y a la toma de decisiones informadas para la conservación del suelo y los recursos naturales.

* + 1. **Sensores y resolución**

La teledetección es una técnica que implica la adquisición de información sobre la superficie terrestre a distancia, utilizando sensores remotos que capturan la radiación electromagnética emitida o reflejada por la Tierra. La resolución en teledetección se refiere a la capacidad del sensor para detectar y representar detalles finos en la imagen o datos recopilados. Esta resolución puede dividirse en tres aspectos principales:

**Resolución Espacial:** La resolución espacial se relaciona con la capacidad del sensor para distinguir objetos o características individuales en la superficie terrestre. Se mide en unidades de distancia (por ejemplo, metros) y se refiere al tamaño del píxel en la imagen. Una mayor resolución espacial permite capturar detalles más finos en la imagen, mientras que una menor resolución espacial proporciona una vista más generalizada del área. La resolución espacial es esencial para identificar y analizar objetos pequeños o cambios sutiles en el paisaje, como parcelas agrícolas, edificaciones, cuerpos de agua o cambios en el uso del suelo.

**Resolución Espectral:** La resolución espectral se refiere a la capacidad del sensor para detectar diferentes bandas espectrales del espectro electromagnético. Los sensores de teledetección pueden capturar información en diversas longitudes de onda, como luz visible, infrarrojo cercano, infrarrojo medio y microondas. Cada banda espectral proporciona información única sobre la composición y propiedades de la superficie terrestre. Una mayor resolución espectral permite una discriminación más precisa de diferentes materiales y características en el paisaje, lo que es valioso para estudios detallados de vegetación, tipos de suelo y otras características.

**Resolución Temporal:** La resolución temporal se relaciona con la frecuencia con la que el sensor recopila datos sobre una ubicación específica en el tiempo. Un sensor con alta resolución temporal captura imágenes o datos de forma frecuente, lo que permite realizar un monitoreo continuo de los cambios en la superficie terrestre a lo largo del tiempo. Por otro lado, un sensor con baja resolución temporal adquiere datos de forma menos frecuente. La resolución temporal es importante para el seguimiento de cambios dinámicos en el paisaje, como el crecimiento de cultivos, la expansión urbana, cambios estacionales o fenómenos naturales.

* + - 1. **Resolución espacial**

La resolución espacial de las imágenes satelitales es uno de los aspectos esenciales de la teledetección. El nivel de detalle de una imagen depende de la resolución espacial del satélite que tomó dicha imagen. Aunque existe la idea de que cuanto más detalle mejor, la realidad es que la cantidad de detalle necesaria varía mucho del objetivo que se persiga. Conocer las diferentes opciones de resolución espacial es la clave para tomar una decisión adecuada sobre lo mejor para su empresa.

* + - 1. **Resolución espectral**

La resolución espectral hace referencia a la posibilidad de bandas del espectro electromagnético que han sido posibles detectar con el sensor. En las cámaras digitales convencionales, como las de nuestros teléfonos, la resolución espectral es 3, porque solo guardan las bandas R, G y B y con la combinación respectiva de ellas forman los colores de las imágenes. Así si decíamos que una imagen era como una cuadrícula de hoja de Excel, una imagen de 3 bandas de resolución espectral sería como un libro de Excel con 3 hojas.

* + - 1. **Resolución radiométrica**

La resolución radiométrica hace referencia a la cantidad de niveles digitales en la que es posible guardar la información recibida de una imagen. Cada imagen, digitalmente, se guarda en bytes y cada byte está compuesto por 8 bits. Un valor, computacionalmente hablando, se puede guardar como un «0» o un «1», decir que algo tiene 8 bits de información hace referencia a la posibilidad de combinar esos ceros y unos en 8 subespacios diferentes, es decir, 2^8 que es igual a 256 posibilidades.

La resolución radiométrica hace referencia a cuanta información ha sido posible que el sensor distinga, a mayor resolución radiométrica, mayor posibilidad de que la información sea más variada.

* + - 1. **Resolución temporal**

La resolución temporal se relaciona con la frecuencia con la que el sensor recopila datos sobre una ubicación específica en el tiempo. Un sensor con alta resolución temporal captura imágenes o datos de forma frecuente, lo que permite realizar un monitoreo continuo de los cambios en la superficie terrestre a lo largo del tiempo. Por otro lado, un sensor con baja resolución temporal adquiere datos de forma menos frecuente. La resolución temporal es importante para el seguimiento de cambios dinámicos en el paisaje, como el crecimiento de cultivos, la expansión urbana, cambios estacionales o fenómenos naturales.

* + 1. **Tipo de imágenes de teledetección**

Existen varios tipos de imágenes de teledetección, cada uno capturado por diferentes tipos de sensores remotos que operan en diferentes bandas del espectro electromagnético. A continuación, se presentan algunos de los tipos de imágenes de teledetección más comunes:

**Imágenes Ópticas:** Estas imágenes son capturadas por sensores ópticos que detectan la radiación electromagnética en las bandas visibles (como el rojo, verde y azul) y en el infrarrojo cercano. Las imágenes ópticas proporcionan información sobre la reflectancia de la superficie terrestre y son ampliamente utilizadas en la identificación de usos del suelo, cambios en la vegetación y monitoreo de cultivos.

**Imágenes de Radar:** Estas imágenes son obtenidas a través de sensores que utilizan ondas de radar para detectar la radiación electromagnética. Los sensores de radar pueden operar en diferentes longitudes de onda, como las bandas L, C, X, S y Ku. Las imágenes de radar son útiles para el monitoreo en todas las condiciones climáticas y proporcionan información sobre la topografía, la humedad del suelo y cambios en la superficie terrestre.

**Imágenes de Infrarrojo Térmico:** Estas imágenes son capturadas por sensores que detectan la radiación térmica emitida por la superficie terrestre en la banda del infrarrojo térmico. Proporcionan información sobre la temperatura de la superficie y son valiosas en la detección de anomalías térmicas, como incendios forestales y cambios en la temperatura del suelo.

**Imágenes Hiperespectrales:** Estas imágenes son capturadas por sensores que dividen el espectro electromagnético en numerosas bandas espectrales estrechas, permitiendo una discriminación detallada de diferentes materiales y características en la superficie terrestre. Las imágenes hiperespectrales son útiles en aplicaciones de análisis mineralógico, evaluación de la salud de la vegetación y detección de contaminantes.

Imágenes de Microondas: Estas imágenes son obtenidas a través de sensores que operan en longitudes de onda de microondas. Proporcionan información sobre la humedad del suelo, la topografía y la estructura del terreno, y pueden penetrar las nubes y la vegetación densa.

Imágenes Multiespectrales: Estas imágenes son capturadas por sensores que operan en múltiples bandas espectrales, que pueden incluir las bandas visibles, infrarrojo cercano y algunos segmentos del infrarrojo térmico. Las imágenes multiespectrales son ampliamente utilizadas en aplicaciones de teledetección y son adecuadas para muchas tareas de análisis y monitoreo.

* + - 1. **Imágenes multiespectrales**

Las imágenes multiespectrales son relevantes y tienen una fuerte relación con tu tema de tesis sobre el desarrollo de un Sistema de Información Geográfica (SIG) web para la predicción de la erosión hídrica de suelos utilizando sensores remotos y técnicas de Machine Learning (ML) en la provincia de Imbabura.

Las imágenes multiespectrales son capturadas por sensores remotos que operan en múltiples bandas espectrales, lo que les permite recopilar información en diferentes rangos del espectro electromagnético, incluyendo bandas visibles, infrarrojo cercano y, a veces, infrarrojo térmico. La ventaja de las imágenes multiespectrales radica en que pueden proporcionar información valiosa sobre la vegetación, el uso del suelo, la salud de los cultivos, y otros factores que influyen en la erosión hídrica

* + - 1. **Imágenes pancromáticas**

Las imágenes pancromáticas son un tipo específico de imágenes de teledetección que capturan información en una sola banda espectral, a diferencia de las imágenes multiespectrales que recopilan datos en múltiples bandas espectrales. La banda pancromática generalmente se encuentra en el rango visible del espectro electromagnético, lo que permite capturar información en la parte visible del espectro, similar a lo que puede ver el ojo humano.

**Características:**

Resolución Espacial de Alta Calidad: Las imágenes pancromáticas suelen tener una alta resolución espacial, lo que significa que pueden capturar detalles finos y precisos en la superficie terrestre. Esto las hace ideales para aplicaciones que requieren una alta precisión en la identificación de objetos y características.

Sensibilidad a la Luz Visible: Al estar limitadas a una sola banda en el rango visible, estas imágenes son particularmente sensibles a la luz visible. Esto les permite capturar detalles visuales que son relevantes para aplicaciones como cartografía, topografía y estudios de áreas urbanas.

**Aplicaciones:**

**Cartografía y Topografía:** Las imágenes pancromáticas son ampliamente utilizadas en aplicaciones cartográficas y topográficas debido a su alta resolución espacial y capacidad para capturar detalles finos en el terreno. Son útiles para generar mapas de alta precisión y modelos digitales del terreno.

**Estudios Urbanos:** Estas imágenes son valiosas para estudios urbanos, como planificación urbana, detección de cambios en áreas urbanas y análisis de crecimiento urbano. La alta resolución espacial permite identificar edificaciones, carreteras y otros elementos urbanos con mayor detalle.

**Análisis de Infraestructuras:** Las imágenes pancromáticas se utilizan para el análisis de infraestructuras, como líneas de transmisión eléctrica, redes de transporte y distribución de recursos. La alta resolución espacial es útil para la identificación y monitoreo de elementos de infraestructura críticos.

* + - 1. **Imágenes fusionadas**

Las imágenes fusionadas en teledetección se refieren al proceso de combinar imágenes tomadas en diferentes bandas espectrales o con diferentes resoluciones espaciales para obtener una imagen final más completa y detallada. La fusión de imágenes busca aprovechar las ventajas de cada tipo de imagen y proporcionar una visión más integrada de la superficie terrestre.

Existen diferentes técnicas de fusión de imágenes que se utilizan según los objetivos específicos de la aplicación y los datos disponibles. Algunas de las técnicas comunes de fusión de imágenes son:

**Fusión de bandas:** Consiste en combinar imágenes tomadas en diferentes bandas espectrales (multiespectrales) en una sola imagen en color. Por ejemplo, se pueden fusionar imágenes capturadas en las bandas roja, verde y azul para formar una imagen en color natural que se asemeje a lo que el ojo humano percibiría. Esta fusión permite una mejor visualización de la información contenida en cada banda y es útil para análisis visuales.

Fusión IHS (Intensidad, Matiz y Saturación): Esta técnica de fusión transforma las imágenes multiespectrales a una representación de Intensidad, Matiz y Saturación (IHS). Luego, se fusiona la información de intensidad de la imagen con las otras bandas espectrales, lo que preserva la información de intensidad (detalle espacial) y agrega información espectral y color a la imagen final.

**Fusión de resolución espacial:** En esta técnica, se combina una imagen de alta resolución espacial (como una imagen pancromática) con una imagen de baja resolución espacial (como una imagen multiespectral). La información de alta resolución espacial se transfiere a la imagen multiespectral, mejorando los detalles en la imagen resultante.

**Fusión de datos LIDAR y teledetección:** Esta técnica combina datos de teledetección con datos LIDAR (Light Detection and Ranging) para obtener una imagen con información tanto de la superficie terrestre como de la elevación del terreno. Esta fusión es valiosa para aplicaciones de análisis de terreno, modelado de elevación y cambios topográficos.

La fusión de imágenes puede ser especialmente útil en aplicaciones como análisis de uso del suelo, detección de cambios, evaluación de la vegetación y estudios de cambios en el paisaje. En el contexto de tu tesis sobre la predicción de la erosión hídrica de suelos en la provincia de Imbabura, la fusión de imágenes puede proporcionar una visión más completa y detallada de los factores que influyen en la erosión, lo que puede mejorar la precisión y efectividad el el SIG web para la predicción de la erosión hídrica en la región.

* + - 1. **Imagen estéreo**

La imagen estéreo es un tipo especial de imagen utilizada en la teledetección y otras aplicaciones que permite obtener información tridimensional de la superficie terrestre. Estas imágenes se capturan utilizando sensores remotos que tienen una disposición estéreo, es decir, tienen dos cámaras (o un sensor con capacidad de estéreo) que capturan la misma área desde diferentes ángulos o posiciones.

La principal característica de las imágenes estéreo es que proporcionan una perspectiva diferente de la misma área desde cada cámara, lo que permite crear una ilusión de profundidad. Al combinar las dos imágenes estéreo en un visor o a través de técnicas de interpretación, es posible percibir la elevación del terreno y generar modelos digitales de elevación (MDE) o modelos digitales del terreno (MDT). Estos modelos contienen información sobre la altitud o la elevación de cada punto en la superficie terrestre, lo que permite obtener una representación tridimensional de la zona observada.

La imagen estéreo es especialmente útil para aplicaciones de cartografía, topografía, geomorfología y estudios de elevación del terreno. Algunas de sus aplicaciones incluyen:

**Generación de Modelos Digitales de Elevación (MDE) y Modelos Digitales del Terreno (MDT):** Las imágenes estéreo permiten obtener información precisa sobre la altitud y la elevación del terreno, lo que es útil para estudios hidrológicos, planificación urbana, análisis geomorfológicos y simulaciones de inundaciones.

**Creación de Fotogrametría Aérea:** La imagen estéreo se utiliza en la fotogrametría aérea para realizar mediciones precisas y tridimensionales de la superficie terrestre. Esto es esencial en proyectos de cartografía y elaboración de mapas detallados.

**Análisis de Cambios en el Terreno**: Al comparar imágenes estéreo tomadas en diferentes momentos, es posible identificar y analizar cambios en la topografía del terreno, como movimientos de tierra, erosión y deposición.

**Planificación de Infraestructuras y Construcción**: Las imágenes estéreo son valiosas para la planificación y el diseño de infraestructuras como carreteras, líneas eléctricas y tuberías, ya que proporcionan información detallada sobre la topografía del área de interés.

L imágenes estéreo son útiles para generar modelos digitales de elevación del terreno, lo que permitiría obtener información tridimensional sobre la topografía y el relieve de la región. Esta información puede ser relevante para el análisis de la escorrentía superficial, la identificación de áreas propensas a la erosión y para mejorar la precisión de los modelos de predicción de la erosión hídrica en la provincia.

* + 1. **Satélites**

Existen numerosos satélites de teledetección que se utilizan para capturar imágenes e información sobre la superficie terrestre desde el espacio. Cada satélite tiene diferentes características, capacidades y objetivos de misión. A continuación, mencionaré algunos de los satélites de teledetección más conocidos y utilizados:

**Landsat:** La serie de satélites Landsat es una de las misiones más largas y exitosas en teledetección. Los satélites Landsat han proporcionado imágenes continuas y globales desde 1972. Actualmente, se encuentra en órbita la misión Landsat 8 y Landsat 9, que capturan imágenes en diferentes bandas espectrales y resoluciones espaciales, lo que los hace valiosos para monitorear cambios en el uso del suelo, la vegetación y los recursos naturales.

**Sentinel (Copernicus):** La misión Sentinel es parte del programa Copernicus de la Unión Europea, que ofrece una constelación de satélites para monitorear la Tierra y su entorno. Sentinel 2 es especialmente relevante, ya que proporciona imágenes multiespectrales de alta resolución con una amplia cobertura global, lo que es útil para aplicaciones agrícolas, de gestión de recursos naturales y seguimiento de cambios en el medio ambiente.

**MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer):** A bordo de los satélites Terra y Aqua de la NASA, el instrumento MODIS proporciona imágenes de alta resolución temporal en diferentes bandas espectrales. Se utiliza para monitorear fenómenos climáticos, cambios en la vegetación y la cobertura terrestre, así como para estudiar la calidad del aire y la atmósfera.

**SPOT (Satellite Pour l'Observation de la Terre):** Los satélites SPOT, desarrollados por Francia, han proporcionado imágenes de alta resolución espacial y espectral desde la década de 1980. Son utilizados en aplicaciones cartográficas, planificación urbana, agricultura y gestión de recursos naturales.

**WorldView:** La serie de satélites WorldView, operados por Maxar Technologies, proporciona imágenes de alta resolución espacial que son ampliamente utilizadas en aplicaciones comerciales, gubernamentales y científicas. WorldView 3, por ejemplo, tiene una resolución espacial de hasta 30 cm en pancromático y 1.24 m en imágenes multiespectrales.

**GOES (Geostationary Operational Environmental Satellites):** Los satélites GOES, operados por la NOAA (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica) de EE. UU., se utilizan para monitorear el clima, las condiciones atmosféricas y los eventos climáticos en tiempo real desde una posición geostacionaria.

* + 1. **LANDSAT**

Landsat es una serie de satélites de teledetección desarrollados y operados conjuntamente por la NASA (Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio) de Estados Unidos y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). Esta misión ha sido fundamental en la recopilación continua y sistemática de imágenes de la superficie terrestre desde 1972.

A lo largo de los años, la serie de satélites Landsat ha sido una herramienta invaluable para la observación de la Tierra y ha proporcionado una valiosa base de datos para el monitoreo y análisis de diversos aspectos de nuestro planeta. Algunas características importantes de los satélites Landsat son:

Multiespectralidad: Los satélites Landsat capturan imágenes en múltiples bandas espectrales, lo que permite obtener información detallada sobre diferentes características de la superficie terrestre, como la vegetación, los cuerpos de agua, la cobertura del suelo y otros elementos.

Resolución Espacial: Los satélites Landsat han mejorado significativamente su resolución espacial a lo largo de las diferentes misiones. Por ejemplo, Landsat 8, que fue lanzado en 2013, tiene una resolución espacial de 30 metros para las bandas multiespectrales y de 15 metros para la banda pancromática. Esta alta resolución permite detectar cambios y características con mayor detalle.

Repetición Temporal: Los satélites Landsat tienen una alta tasa de repetición temporal, lo que significa que vuelven a tomar imágenes de la misma área cada cierto tiempo. Por ejemplo, Landsat 8 recopila imágenes de casi todo el globo terráqueo cada 16 días. Esta frecuencia de adquisición es esencial para el monitoreo y seguimiento de cambios en la superficie terrestre a lo largo del tiempo.

Libre y Abierto: Una característica destacada de la misión Landsat es que sus datos están disponibles de forma gratuita y abierta para cualquier usuario en todo el mundo. Esto ha permitido que científicos, planificadores, agricultores, gobiernos y otras entidades utilicen estos datos para una amplia gama de aplicaciones.

Continuidad de la Misión: La serie de satélites Landsat ha demostrado una notable continuidad a lo largo de las décadas. Cada nueva misión ha mejorado y complementado los datos de las anteriores, lo que ha creado una valiosa serie temporal de información para el estudio de la Tierra.

El uso de los datos Landsat ha sido fundamental en estudios relacionados con la gestión de recursos naturales, la planificación territorial, la agricultura, la gestión del agua, la monitorización de desastres naturales y el seguimiento de cambios ambientales y climáticos pa obtener los datos y obtener información valiosa sobre la región y mejorar la precisión de tus análisis y predicciones.

* + - 1. **Descripción**

Landsat es una serie de satélites de teledetección desarrollada y operada conjuntamente por la NASA (Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio) y el USGS (Servicio Geológico de Estados Unidos). El programa Landsat ha sido una de las misiones más importantes y longevas en la observación de la Tierra desde el espacio, proporcionando una valiosa fuente de datos para el estudio y monitoreo de la superficie terrestre.

El programa Landsat se inició en 1972 con el lanzamiento del primer satélite de la serie, Landsat 1, y ha continuado con varias misiones sucesivas, incluidos los satélites Landsat 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y, más recientemente, el Landsat 9, que fue lanzado en septiembre de 2021.

* + - 1. **Tipo de satélites**

A lo largo de la historia del programa Landsat, se han lanzado varios tipos de satélites, cada uno con características y mejoras técnicas específicas. A continuación, se mencionan los principales tipos de satélites Landsat que han sido parte de la serie:

**Landsat 1 y Landsat 2:** Estos fueron los primeros satélites de la serie Landsat, lanzados en 1972 y 1975, respectivamente. Eran conocidos como los satélites "MSS" (Multi-Spectral Scanner), ya que llevaban el instrumento MSS para capturar imágenes multiespectrales en cuatro bandas.

**Landsat 3:** Lanzado en 1978, fue otro satélite de la serie MSS con mejoras en la duración y la calidad de la misión.

**Landsat 4 y Landsat 5:** Estos satélites fueron lanzados en 1982 y 1984, respectivamente, y eran conocidos como los satélites "TM" (Thematic Mapper). Introdujeron el instrumento Thematic Mapper, que ofrecía imágenes multiespectrales de mayor resolución espacial (30 metros) y más bandas espectrales (seis bandas).

**Landsat 6:** Fue lanzado en 1993, pero la misión no tuvo éxito debido a una falla en el satélite poco después del lanzamiento. No pudo proporcionar datos operativos.

**Landsat 7:** Lanzado en 1999, el satélite Landsat 7 llevaba el sensor ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus), que mejoró aún más la resolución espacial y el número de bandas espectrales. Sin embargo, en 2003, un problema con el escáner del sensor provocó la pérdida de datos en algunas franjas de las imágenes, lo que afectó parcialmente su capacidad operativa.

**Landsat 8:** Lanzado en 2013, es el último satélite de la serie Landsat que está activo en la actualidad. Lleva el sensor OLI (Operational Land Imager) y el sensor TIRS (Thermal Infrared Sensor), que proporcionan imágenes multiespectrales y térmicas de alta calidad. Landsat 8 tiene una resolución espacial de 30 metros para las bandas multiespectrales y de 100 metros para la banda térmica.

**Landsat 9:** Fue lanzado en septiembre de 2021 y es el sucesor de Landsat 8. Lleva el mismo conjunto de sensores OLI y TIRS, lo que garantiza la continuidad en la adquisición de datos de alta calidad para la serie Landsat.

* + - 1. **Resolución espacial y espectral**

Landsat es conocido por ofrecer imágenes de teledetección con una combinación de resolución espacial y espectral que permite una amplia variedad de aplicaciones. A continuación, se detallan las características de la resolución espacial y espectral de los satélites Landsat:

**Resolución Espacial:**

Landsat 1 a Landsat 5: Los satélites Landsat 1 a 5 llevaban el sensor MSS (Multi-Spectral Scanner), que ofrecía una resolución espacial de aproximadamente 57 metros para las bandas multiespectrales.

Landsat 4 y Landsat 5 (a partir de 1982): Con el sensor TM (Thematic Mapper), la resolución espacial se mejoró a 30 metros para las bandas multiespectrales. La banda pancromática tenía una resolución espacial de 15 metros.

Landsat 7: Continuó con la misma resolución espacial de Landsat 4 y 5, con 30 metros para las bandas multiespectrales y 15 metros para la banda pancromática.

Landsat 8 y Landsat 9: Estos satélites, equipados con el sensor OLI (Operational Land Imager), mantienen la resolución espacial de 30 metros para las bandas multiespectrales. La banda pancromática tiene una resolución espacial de 15 metros.

**Resolución Espectral:**

Landsat 1 a Landsat 3: Los satélites MSS tenían cuatro bandas espectrales: azul (0.45-0.52 μm), verde (0.52-0.60 μm), rojo (0.63-0.69 μm) e infrarrojo cercano (0.76-0.90 μm).

Landsat 4 y Landsat 5: Los sensores TM añadieron más bandas espectrales, proporcionando seis bandas: azul, verde, rojo, infrarrojo cercano, infrarrojo medio y térmico de onda larga (10.4-12.5 μm).

Landsat 7: El sensor ETM+ mejoró la precisión radiométrica y espectral de las imágenes, manteniendo las mismas seis bandas espectrales que Landsat 4 y 5.

Landsat 8 y Landsat 9: Con el sensor OLI, se mejoró la precisión radiométrica y se agregó una banda adicional en el espectro azul-violeta (coastal aerosol) en comparación con los sensores TM y ETM+. Por lo tanto, tienen un total de 11 bandas espectrales: coastal aerosol, azul, verde, rojo, infrarrojo cercano, infrarrojo de onda corta 1, infrarrojo de onda corta 2, infrarrojo medio 1, infrarrojo medio 2, infrarrojo térmico 1 y infrarrojo térmico 2.

La combinación de alta resolución espacial y varias bandas espectrales permite a los satélites Landsat proporcionar información detallada y valiosa para una amplia gama de aplicaciones, incluidos estudios de vegetación, uso del suelo, agricultura, gestión de recursos naturales, análisis ambiental y seguimiento de cambios en el paisaje a lo largo del tiempo. Esta serie de satélites ha sido esencial para el monitoreo global y regional de la superficie terrestre y el medio ambiente.

* + - 1. **Uso de las imágenes Landsat**

El uso de las imágenes Landsat ha sido de gran importancia en diversos campos de estudio y aplicaciones debido a su amplia cobertura, repetición temporal y combinación de resolución espacial y espectral. Algunos de los principales usos de las imágenes Landsat incluyen:

Monitoreo del Uso del Suelo y Cambios en la Cobertura Terrestre: Las imágenes Landsat son ampliamente utilizadas para estudiar y monitorear los cambios en el uso del suelo y la cobertura terrestre a lo largo del tiempo. Esto es fundamental para comprender la expansión urbana, la deforestación, la degradación del suelo, la expansión agrícola y otros cambios en el paisaje que afectan el medio ambiente y la sostenibilidad.

Agricultura y Silvicultura: Los datos Landsat son valiosos para la gestión agrícola y forestal. Los agricultores y silvicultores pueden utilizar las imágenes para evaluar la salud de los cultivos, monitorear el crecimiento de las plantaciones forestales, detectar enfermedades de cultivos y optimizar las prácticas agrícolas y forestales.

Estudios de la Vegetación: Las imágenes Landsat son esenciales para estudiar la distribución y salud de la vegetación. Se pueden realizar análisis de índices de vegetación, como el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), para evaluar la vitalidad de los ecosistemas, identificar áreas de vegetación degradada y monitorear la dinámica de la vegetación a lo largo del tiempo.

Gestión de Recursos Naturales: Las imágenes Landsat se utilizan para la gestión sostenible de recursos naturales, como la gestión de agua y tierras, el monitoreo de la calidad del agua y la identificación de áreas de conservación y biodiversidad.

Detección y Monitoreo de Desastres Naturales: Las imágenes Landsat son fundamentales para la detección y monitoreo de desastres naturales, como incendios forestales, inundaciones, terremotos y erupciones volcánicas. Estas imágenes proporcionan información valiosa para las operaciones de respuesta y recuperación después de desastres.

Planificación Urbana y Gestión del Territorio: Los datos Landsat son esenciales para la planificación urbana y la gestión del territorio. Los planificadores pueden utilizar estas imágenes para evaluar el crecimiento urbano, el uso de suelo actual y potencial, y para identificar áreas adecuadas para desarrollo urbano y preservación de espacios verdes.

Seguridad Alimentaria: Las imágenes Landsat son utilizadas en la estimación de cultivos y en el monitoreo de la producción agrícola para evaluar la seguridad alimentaria y prevenir la escasez de alimentos.

Estudios Ambientales y Cambio Climático: Los datos Landsat son fundamentales para el estudio de fenómenos ambientales, como el cambio climático, la pérdida de hábitat, la erosión y la degradación del suelo, y la evaluación de la salud de los ecosistemas.

En resumen, las imágenes Landsat son una herramienta poderosa y versátil para una amplia variedad de aplicaciones en ciencias ambientales, agrícolas, forestales, hidrológicas, urbanas y climáticas. Su disponibilidad gratuita y abierta ha democratizado el acceso a la información espacial, lo que ha permitido a científicos, gobiernos, organizaciones y comunidades utilizar estos datos para tomar decisiones informadas y abordar desafíos ambientales y sociales.

* + 1. **SENTINEL**

Sentinel es una serie de misiones de satélites de teledetección operados por la Agencia Espacial Europea (ESA) como parte del programa Copernicus. El objetivo del programa Copernicus es proporcionar datos gratuitos y abiertos de observación de la Tierra para una amplia variedad de aplicaciones, incluyendo monitoreo ambiental, seguridad, agricultura, gestión de emergencias, cambio climático y muchas otras áreas.

La serie Sentinel consta de múltiples misiones, cada una con un enfoque y características específicas para abordar diferentes necesidades de observación de la Tierra. Hasta la fecha de mi conocimiento en septiembre de 2021, las misiones Sentinel incluyen:

**Sentinel-1:** Es un satélite que utiliza un radar de apertura sintética (SAR) para obtener imágenes de la superficie terrestre en cualquier condición climática y en cualquier momento del día o de la noche. Sentinel-1 es especialmente valioso para el monitoreo marítimo y terrestre, incluyendo la detección de derrames de petróleo, seguimiento de cambios en el hielo marino, mapeo de inundaciones y observación de deslizamientos de tierra.

**Sentinel-2:** Este satélite proporciona imágenes multiespectrales de alta resolución espacial para el monitoreo ambiental y la gestión del territorio. Sentinel-2 es muy útil para estudiar la vegetación, cambios en el uso del suelo, calidad del agua, incendios forestales, áreas urbanas y otros aspectos relacionados con la tierra.

**Sentinel-3:** Su principal enfoque es medir de manera precisa la superficie del mar, incluyendo la altura del mar, la temperatura de la superficie del mar y la coloración del océano. También proporciona datos sobre la superficie terrestre y la vegetación. Sentinel-3 es fundamental para el monitoreo oceanográfico y meteorológico.

**Sentinel-4 y Sentinel-5:** Estos son instrumentos de monitoreo de la atmósfera que se ubicarán en satélites meteorológicos operados por la Organización Europea para la Explotación de Satélites Meteorológicos (EUMETSAT). Sentinel-4 se enfoca en mediciones de gases atmosféricos y aerosoles, mientras que Sentinel-5 se centra en la composición atmosférica global.

**Sentinel-6:** Es una colaboración con la NASA para medir la altura del nivel del mar con alta precisión. Ayuda a estudiar el cambio climático y monitorear el aumento del nivel del mar, proporcionando información esencial para comprender el cambio en el clima global.

La serie Sentinel ha revolucionado el acceso a los datos de observación de la Tierra al ofrecer información gratuita y abierta a nivel global. Estos datos son utilizados por una amplia variedad de usuarios, incluyendo investigadores, gobiernos, organizaciones internacionales y empresas, para abordar desafíos ambientales, mejorar la toma de decisiones y avanzar en la comprensión del cambio global en la Tierra. Sentinel ha demostrado ser una contribución significativa para el monitoreo ambiental y la gestión sostenible de los recursos naturales.

* + - 1. **Descripción**

Sentinel es una serie de satélites de teledetección operados por la Agencia Espacial Europea (ESA) como parte del programa Copernicus. El programa Copernicus es una iniciativa global de observación de la Tierra que proporciona datos gratuitos y abiertos para una amplia variedad de aplicaciones en monitoreo ambiental, seguridad, agricultura, gestión de emergencias, cambio climático, entre otros.

La serie Sentinel consta de varias misiones con diferentes tipos de sensores que capturan datos de la Tierra desde el espacio con una alta frecuencia de revisita y una cobertura global. Cada misión de Sentinel se enfoca en proporcionar datos específicos para aplicaciones particulares.

* + - 1. **Bandas espectrales**

Las bandas espectrales se refieren a las diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético que son detectadas por los sensores de teledetección en los satélites o plataformas de observación de la Tierra. Cada banda representa una porción específica del espectro electromagnético y tiene su propia información característica sobre los objetos y fenómenos presentes en la superficie terrestre. La elección de las bandas espectrales puede variar según el tipo de sensor y la misión, pero a continuación se describen algunas de las bandas espectrales más comunes utilizadas en la teledetección:

**Azul (Banda B):** Se encuentra en el rango de aproximadamente 0.45 a 0.52 micrómetros (). Es sensible a la reflectancia de la luz azul y proporciona información sobre cuerpos de agua, la calidad del agua, la vegetación y la presencia de nubes y aerosoles.

**Verde (Banda G):** Está en el rango de aproximadamente 0.52 a 0.60 . Es sensible a la reflectancia de la luz verde y proporciona información sobre la salud de la vegetación y los cambios en el uso del suelo.

**Rojo (Banda R):** Se encuentra en el rango de aproximadamente 0.63 a 0.69 . Es sensible a la reflectancia de la luz roja y proporciona información sobre la vegetación, la salud de las plantas y la detección de vegetación estresada.

**Infrarrojo Cercano (Banda NIR):** Está en el rango de aproximadamente 0.76 a 0.90 . Es sensible a la reflectancia del infrarrojo cercano y es valiosa para el monitoreo de la vegetación, la salud de los cultivos, la detección de estrés hídrico y la evaluación de la cobertura vegetal.

**Infrarrojo de Onda Corta 1 (Banda SWIR 1):** Se encuentra en el rango de aproximadamente 1.55 a 1.75 . Es útil para identificar tipos de rocas, minerales, contenido de agua y para la detección de áreas quemadas.

**Infrarrojo de Onda Corta 2 (Banda SWIR 2):** Está en el rango de aproximadamente 2.10 a 2.35 . Proporciona información sobre la vegetación, la humedad del suelo y la detección de minerales y suelos alterados.

**Infrarrojo Térmico (Banda TIR):** Esta banda abarca diferentes longitudes de onda en el rango de aproximadamente 10.4 a 12.5 . Es sensible a la radiación térmica emitida por la superficie terrestre y es utilizada para estimar la temperatura de la superficie y la detección de incendios.

**Pancromática:** Es una banda de alta resolución que abarca el espectro visible y parte del infrarrojo cercano, generalmente de 0.50 a 0.90 . Esta banda proporciona imágenes más detalladas, pero solo en tonos de gris.

Cabe mencionar que algunos sensores tienen más bandas espectrales o bandas adicionales con propósitos específicos, como la detección de aerosoles, la calidad del aire o la composición atmosférica. La combinación de diferentes bandas espectrales permite obtener información rica y diversa sobre la superficie terrestre, lo que es esencial para aplicaciones en agricultura, silvicultura, estudios ambientales, cambio climático, gestión de recursos naturales y otras áreas de investigación y gestión.

* + - 1. **Aplicaciones**

Los satélites Sentinel, como parte del programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea (ESA), ofrecen una amplia variedad de aplicaciones y usos en la teledetección y monitoreo de la Tierra. Algunas de las principales aplicaciones y usos de las misiones Sentinel incluyen:

**Monitoreo de la Cobertura Terrestre:** Las imágenes de Sentinel-1 y Sentinel-2 son valiosas para el monitoreo de la cobertura terrestre y los cambios en el uso del suelo. Esto es esencial para estudiar la expansión urbana, cambios en la vegetación, deforestación, regeneración forestal y dinámicas de la superficie terrestre.

**Gestión de Recursos Naturales:** Sentinel-1 y Sentinel-2 son útiles para la gestión sostenible de recursos naturales como bosques, cultivos agrícolas, cuerpos de agua y áreas costeras. Estos datos son fundamentales para la toma de decisiones en agricultura, pesca, silvicultura y gestión de ecosistemas acuáticos.

**Estudios Agrícolas:** Las imágenes de Sentinel-1 y Sentinel-2 son utilizadas para monitorear cultivos, evaluar la salud de las plantaciones y pronosticar rendimientos agrícolas. Esto es esencial para la seguridad alimentaria, el apoyo a los agricultores y la gestión eficiente de recursos agrícolas.

**Estudios de la Vegetación:** Sentinel-2 proporciona imágenes multiespectrales de alta resolución que son fundamentales para estudiar la salud y distribución de la vegetación. Se utilizan para el monitoreo de la vegetación, estudios de biodiversidad, detección de áreas afectadas por plagas o enfermedades y evaluación de la cubierta vegetal.

**Estudios Oceanográficos y Costeros:** Sentinel-3 proporciona mediciones globales de la superficie del mar, la temperatura de la superficie del mar y la altura del mar. Estos datos son cruciales para la oceanografía, la monitorización de la circulación oceánica, el seguimiento de la calidad del agua y el estudio de eventos como las corrientes oceánicas de El Niño.

**Monitoreo de Desastres Naturales:** Las imágenes de Sentinel-1 y Sentinel-2 son utilizadas para la detección y monitoreo de desastres naturales como inundaciones, terremotos, erupciones volcánicas e incendios forestales. Proporcionan información valiosa para la respuesta de emergencia y la evaluación de daños.

**Estudios Climáticos y Cambio Climático:** Sentinel-3 y los sensores atmosféricos de Sentinel-4 y Sentinel-5 son esenciales para estudiar el cambio climático, monitorear variables climáticas y la composición de la atmósfera. Estos datos son utilizados en investigaciones climáticas y en el seguimiento de gases de efecto invernadero y contaminantes atmosféricos.

**Planificación Urbana y Gestión del Territorio:** Las imágenes de Sentinel-2 son útiles para la planificación urbana, la gestión del crecimiento urbano y la zonificación del territorio. Ayudan a evaluar el impacto de la urbanización en el entorno natural y a diseñar estrategias de desarrollo sostenible.

Estas son solo algunas de las aplicaciones y usos más destacados de los satélites Sentinel. Su amplia gama de sensores y capacidades ha permitido que estas misiones sean una valiosa fuente de datos para una variedad de sectores y campos de estudio, brindando información esencial para la toma de decisiones, la investigación científica y el monitoreo ambiental a nivel global.

* + 1. **Procesamiento, interpretación y análisis de datos**

**Procesamiento de datos**: Esta etapa implica la recopilación, limpieza, organización y preparación de los datos para su posterior análisis. En esta fase, se pueden aplicar técnicas de limpieza de datos para eliminar valores atípicos, datos duplicados o faltantes, y asegurarse de que los datos sean coherentes y confiables.

**Interpretación de datos**: Una vez que los datos han sido procesados, es importante comprender su significado y contexto. En esta fase, los investigadores o analistas buscan patrones, tendencias o relaciones entre variables que puedan ayudar a obtener información relevante sobre el fenómeno estudiado.

**Análisis de datos**: Es la etapa en la que se aplican diversas técnicas estadísticas, matemáticas o de aprendizaje automático para obtener conocimiento a partir de los datos. Los análisis pueden ser descriptivos, inferenciales o predictivos, dependiendo del objetivo del estudio y los datos disponibles.

* + 1. **Exploradores de datos**

Los exploradores de datos son profesionales especializados en la búsqueda, recopilación, análisis y visualización de información relevante y valiosa a partir de conjuntos de datos. Su objetivo es descubrir patrones, tendencias y relaciones que puedan proporcionar información útil para la toma de decisiones y el desarrollo de soluciones en diferentes áreas. Utilizando herramientas y técnicas avanzadas de análisis de datos, como minería de datos, aprendizaje automático y estadísticas, estos expertos ayudan a empresas e investigadores a comprender mejor sus datos, identificar oportunidades y resolver problemas complejos. Los exploradores de datos desempeñan un papel crucial en la era de la información, ya que permiten convertir grandes volúmenes de datos en conocimiento útil para el progreso y la innovación.

* 1. **Machine Learning (ML) e Inteligencia de Ubicación**

**Inteligencia de Ubicación:** La Inteligencia de Ubicación se refiere a la capacidad de recopilar, analizar y utilizar datos geoespaciales para obtener información valiosa y conocimientos sobre lugares y objetos en la Tierra. Esta información se puede utilizar en diversas industrias y aplicaciones, como logística, transporte, ciudades inteligentes, servicios basados en la ubicación, cartografía digital, análisis de riesgos naturales y muchos otros campos. La Inteligencia de Ubicación se basa en la recopilación y análisis de datos geográficos, como coordenadas GPS, mapas, imágenes satelitales y datos de sensores geoespaciales.

**Aprendizaje Automático (Machine Learning, ML):**

El Aprendizaje Automático es una rama de la inteligencia artificial que se enfoca en desarrollar algoritmos y técnicas que permiten a las máquinas aprender patrones y realizar tareas sin ser programadas explícitamente. En lugar de seguir reglas específicas, el ML permite que los sistemas aprendan de datos y experiencias pasadas para mejorar su desempeño en tareas futuras. Los algoritmos de ML son utilizados en una amplia gama de aplicaciones, como clasificación, regresión, agrupación, reconocimiento de patrones, procesamiento del lenguaje natural y mucho más.

**Relación entre Inteligencia de Ubicación y Aprendizaje Automático:**

La integración de la Inteligencia de Ubicación y el Aprendizaje Automático permite aprovechar el poder de los datos geoespaciales para desarrollar modelos predictivos y analíticos más precisos. Algunas aplicaciones prácticas incluyen:

**Predicción de Patrones de Tráfico:** Utilizando datos históricos de tráfico y datos geoespaciales, los modelos de ML pueden predecir patrones de tráfico en tiempo real, lo que ayuda a optimizar rutas y planificar desplazamientos.

**Marketing Basado en la Ubicación**: Al combinar datos de ubicación con información demográfica y preferencias del cliente, se pueden construir modelos de ML que personalicen campañas de marketing según la ubicación.

**Detección de Anomalías Geoespaciales:** Los algoritmos de ML pueden identificar anomalías en patrones geoespaciales, como la detección de áreas inusuales de alta contaminación o comportamientos anómalos en el tráfico de vehículos.

**Recomendaciones de Lugares y Servicios:** Aplicaciones como mapas y plataformas de viajes utilizan ML para ofrecer recomendaciones personalizadas de restaurantes, hoteles y otros servicios basados en la ubicación del usuario.

**Gestión de Recursos Naturales:** La combinación de datos geoespaciales y ML puede ayudar a gestionar de manera más efectiva recursos naturales, como la gestión de bosques, la agricultura de precisión y la monitorización de cuerpos de agua.

* + 1. **Machine Learning (ML)**

Machine Learning (Aprendizaje Automático) es una subdisciplina de la inteligencia artificial (IA) que se enfoca en el desarrollo de algoritmos y modelos estadísticos que permiten a las computadoras aprender a partir de datos sin ser programadas explícitamente para tareas específicas. El objetivo principal del aprendizaje automático es permitir que las computadoras reconozcan patrones, tomen decisiones y mejoren su rendimiento con el tiempo al aprender de los datos proporcionados. Hay tres tipos principales de aprendizaje automático:

**Aprendizaje Supervisado**: En el aprendizaje supervisado, el algoritmo se entrena con datos etiquetados, donde cada punto de datos de entrada está asociado con la salida correcta. Durante el entrenamiento, el algoritmo aprende a mapear las entradas a las salidas, lo que le permite hacer predicciones sobre nuevos datos no vistos. Ejemplos de tareas de aprendizaje supervisado incluyen clasificación de imágenes, reconocimiento de voz y análisis de sentimientos.

**Aprendizaje No Supervisado**: El aprendizaje no supervisado se ocupa de datos no etiquetados, lo que significa que no hay salidas objetivo-predefinidas. El algoritmo intenta encontrar patrones y estructuras en los datos sin ninguna orientación explícita. La agrupación y la reducción de dimensionalidad son tareas comunes en el aprendizaje no supervisado.

**Aprendizaje por Refuerzo**: El aprendizaje por refuerzo se centra en entrenar algoritmos para tomar decisiones en un entorno con el fin de lograr un objetivo específico. El algoritmo aprende recibiendo retroalimentación del entorno en forma de recompensas o penalizaciones por sus acciones. A través de ensayo y error, el modelo mejora sus habilidades de toma de decisiones para maximizar las recompensas.

* + - 1. Definición y conceptos
      2. Aplicaciones en ciencias ambientales
      3. Algoritmos de ML en la erosión de suelos
      4. Selección y extracción de características a partir de imágenes multiespectrales
      5. Evaluación de modelos de ML para la predicción de erosión de suelos
      6. Validación de modelos de ML para la predicción de erosión de suelos
    1. Inteligencia de Ubicación
       1. Definición y conceptos
       2. Aplicaciones en la predicción de erosión de suelos
       3. Aplicaciones en el mapeo de erosión de suelos
       4. Importancia en el análisis geoespacial
       5. Integración de datos geoespaciales y datos espectrales en modelos de IU
  1. Imágenes multiespectrales de suelos, ArcGIS Online y sus aplicaciones
     1. Definición y conceptos
     2. Descripción y características
     3. Sistemas de Información Geográfica
     4. StoryMap
     5. Dashboard
     6. AppBuilder
     7. Usos y aplicaciones

# CAPÍTULO II

# Desarrollo

* 1. Metodología Cross Industry Standard Process for Data Mining (CRISP-DM)
     1. Hola
     2. Hola 2
  2. Especificaciones funcionales y de requerimientos
  3. Diseño conceptual
  4. Implementación, pruebas y mantenimiento

# CAPÍTULO III

# Resultados

* 1. Análisis de resultados
     1. Hola 1
     2. Hola 2
  2. Interpretación de resultados
  3. Pruebas de funcionamiento
  4. Evaluación e impactos de resultados

# CONCLUSIONES

# RECOMENDACIONES

# BIBLIOGRAFÍA

Almouctar, M. A. S., Wu, Y., Zhao, F., & Dossou, J. F. (2021a). Soil erosion assessment using the rusle model and geospatial techniques (Remote sensing and gis) in south-central niger (maradi region). *Water (Switzerland)*, *13*(24). https://doi.org/10.3390/w13243511

Almouctar, M. A. S., Wu, Y., Zhao, F., & Dossou, J. F. (2021b). Soil erosion assessment using the rusle model and geospatial techniques (Remote sensing and gis) in south-central niger (maradi region). *Water (Switzerland)*, *13*(24). https://doi.org/10.3390/w13243511

Data Science Process Alliance. (2023). *What is CRISP DM? - Data Science Process Alliance*. https://www.datascience-pm.com/crisp-dm-2/

Díaz-Narváez, V. P., & Núñez, A. C. (2016). Scientific articles, types of scientific research and productivity in health sciences. *Revista Ciencias de La Salud*, *14*(1), 115–121. https://doi.org/10.12804/REVSALUD14.01.2016.10

Fernández, D., Adermann, E., Pizzolato, M., Pechenkin, R., Rodríguez, C. G., & Taravat, A. (2023). Comparative Analysis of Machine Learning Algorithms for Soil Erosion Modelling Based on Remotely Sensed Data. *Remote Sensing*, *15*(2). https://doi.org/10.3390/rs15020482

Naciones Unidas. (2015). *La FAO identifica las mayores amenazas para los suelos de América Latina*. https://news.un.org/es/story/2015/12/1347201

Naciones Unidas. (2018). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe*. www.issuu.com/publicacionescepal/stacks

Naciones Unidas. (2022). *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible*. https://unstats.un.org/sdgs/report/2022/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2022\_Spanish.pdf

Organismo Internacional de Energía Atómica. (2023). *Control de la erosión del suelo*. https://www.iaea.org/es/temas/control-de-la-erosion-del-suelo

Pacheco, H. A., Méndez, W., & Moro, A. (2019). Soil erosion risk zoning in the ecuadorian coastal region using geo-technological tools. *Earth Sciences Research Journal*, *23*(4), 293–302. https://doi.org/10.15446/esrj.v23n4.71706

Paredes, N. (2018). *El rol de los sistemas agroforestales en la conservación, recuperación y manejo de los suelos en sistemas de producción agropecuarios*. http://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/5450

Quiñónez, P. (2022). *Evaluación de riesgos por erosión hídrica en el suelo de la microcuenca de la quebrada Quitumbe, provincia de Imbabura*. http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/12305/2/PG%201101%20TRABAJO%20GRADO.pdf

# ANEXOS