

**Universidad de Santiago de Chile**

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Informática

---

## **Laboratorio 2**

Detección de Cambios Urbanos

Análisis Multitemporal con Imágenes Satelitales

---

**Desarrollo de Aplicaciones Geoinformáticas**

Semestre 2, 2025

**Autores:** Catalina López  
Felipe Baeza

**Profesor:** Prof. Francisco Parra O.

Enero 2026

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>2</b>
1.1. Contexto y Problemática . . . . .	2
1.2. Relevancia del Estudio . . . . .	2
1.3. Objetivo General . . . . .	2
1.4. Objetivos Específicos . . . . .	2
<b>2. Descripción del Área y Periodo de Estudio</b>	<b>3</b>
2.1. Localización Geográfica y Características del Territorio . . . . .	3
2.2. La Erupción de 2008: Un Evento que Cambió la Historia de Chaitén . . . . .	3
2.2.1. Cronología del Desastre . . . . .	4
2.2.2. Situación Actual y Proceso de Reconstrucción . . . . .	4
2.3. Justificación de la Selección del Área de Estudio . . . . .	4
2.4. Caracterización del Período de Análisis . . . . .	5
<b>3. Metodología Aplicada</b>	<b>5</b>
3.1. Visión General del Flujo de Trabajo . . . . .	5
3.2. Adquisición y Fuentes de Datos . . . . .	6
3.2.1. Descripción del Satélite Sentinel-2 . . . . .	6
3.2.2. Bandas Espectrales Utilizadas . . . . .	6
3.2.3. Datos Vectoriales de Apoyo . . . . .	6
3.3. Cálculo e Interpretación de Índices Espectrales . . . . .	7
3.3.1. NDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada . . . . .	7
3.3.2. NDBI: Índice de Edificación de Diferencia Normalizada . . . . .	7
3.3.3. NDWI: Índice de Agua de Diferencia Normalizada . . . . .	8
3.3.4. BSI: Índice de Suelo Desnudo . . . . .	8
3.4. Métodos de Detección de Cambios . . . . .	8
3.4.1. Método 1: Diferencia de Índices (Análisis de Vectores de Cambio Simplificado) . . . . .	8
3.4.2. Método 2: Clasificación Multiíndice Post-Clasificación . . . . .	9
3.5. Fundamento de los Umbrales Seleccionados . . . . .	9
3.6. Análisis Zonal y Cuantificación de Cambios . . . . .	9
<b>4. Resultados y Hallazgos</b>	<b>10</b>
4.1. Panorama General de los Cambios Detectados . . . . .	10
4.2. Resultados del Método 1: Diferencia de NDVI . . . . .	10
4.3. Resultados del Método 2: Clasificación Multiíndice . . . . .	10
4.4. Análisis de la Evolución Temporal . . . . .	11
4.5. Comparación y Complementariedad de los Métodos . . . . .	12
<b>5. Discusión e Interpretación</b>	<b>12</b>
5.1. Interpretación de los Patrones Espaciales y Temporales . . . . .	12
5.2. Limitaciones del Estudio y Consideraciones Metodológicas . . . . .	12
5.3. Validez y Aplicabilidad de los Resultados . . . . .	13
<b>6. Conclusiones</b>	<b>13</b>
<b>7. Referencias Bibliográficas</b>	<b>13</b>
<b>A. Estructura del Repositorio de Código</b>	<b>15</b>

## 1. Introducción

### 1.1. Contexto y Problemática

El territorio chileno ha experimentado profundas transformaciones en las últimas décadas, impulsadas tanto por el crecimiento demográfico como por fenómenos naturales de gran magnitud. La dinámica de expansión urbana, particularmente evidente en ciudades intermedias y zonas de reconstrucción post-desastre, genera desafíos significativos para la planificación territorial, la gestión ambiental y la toma de decisiones informadas por parte de las autoridades locales.

En este contexto, la teledetección satelital emerge como una herramienta fundamental para el monitoreo sistemático del territorio. Desde el lanzamiento del primer satélite Landsat en 1972, la humanidad ha acumulado un registro continuo de la superficie terrestre que permite estudiar cambios a escalas temporales que abarcan desde semanas hasta décadas. Con la llegada del programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea y sus satélites Sentinel-2 en 2015, se dispone ahora de imágenes de alta resolución espacial (10 metros) con una frecuencia de revisión de apenas 5 días, todo de manera completamente gratuita y abierta.

El presente proyecto surge de la necesidad de aplicar estas tecnologías al estudio de un caso particularmente relevante para Chile: la comuna de Chaitén, cuya historia reciente está marcada por la catastrófica erupción volcánica de 2008 y el subsecuente proceso de reconstrucción que continua hasta el día de hoy. Este caso ofrece una oportunidad única para estudiar cómo las herramientas de teledetección pueden documentar y cuantificar procesos de transformación urbana en contextos de recuperación post-desastre.

### 1.2. Relevancia del Estudio

La importancia de este trabajo trasciende el ámbito puramente académico. En un país como Chile, constantemente expuesto a amenazas naturales como terremotos, erupciones volcánicas, tsunamis e incendios forestales, disponer de metodologías robustas para el monitoreo de cambios territoriales resulta fundamental para:

- **Planificación de la reconstrucción:** Permitir a las autoridades evaluar objetivamente el avance de los procesos de recuperación urbana tras eventos catastróficos.
- **Monitoreo ambiental:** Detectar pérdida de cobertura vegetal, expansión de áreas impermeables y otros cambios con implicancias ecosistémicas.
- **Gestión del riesgo:** Identificar patrones de ocupación del territorio que puedan incrementar la vulnerabilidad frente a futuras amenazas.
- **Ordenamiento territorial:** Proveer insumos técnicos para la actualización de instrumentos de planificación como los Planes Reguladores Comunales.

### 1.3. Objetivo General

El objetivo general de este trabajo es desarrollar un sistema integral de detección y cuantificación de cambios urbanos utilizando series temporales de imágenes satelitales Sentinel-2, aplicando técnicas avanzadas de teledetección, análisis espacial y visualización interactiva, tomando como caso de estudio la comuna de Chaitén en la Región de Los Lagos.

### 1.4. Objetivos Específicos

Para alcanzar el objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

1. Diseñar e implementar un flujo de trabajo automatizado para la adquisición y preprocesamiento de series temporales de imágenes Sentinel-2 correspondientes al periodo 2020-2024.

2. Calcular y analizar indices espectrales multitemporales (NDVI, NDBI, NDWI y BSI) que permitan caracterizar de manera cuantitativa la evolucion de la cobertura del suelo.
3. Implementar y evaluar comparativamente dos metodologias de deteccion de cambios: diferencia de indices y clasificacion multiindice post-clasificacion.
4. Clasificar los cambios detectados segun su naturaleza: urbanizacion, perdida de vegetacion, ganancia de vegetacion y cambios en cuerpos de agua.
5. Desarrollar un analisis zonal que permita cuantificar los cambios en terminos de superficie afectada (hectareas) para diferentes sectores del area de estudio.
6. Construir un dashboard web interactivo utilizando Streamlit que facilite la exploracion visual de los resultados por parte de usuarios no especialistas.
7. Generar productos de visualizacion complementarios, incluyendo animaciones temporales en formato GIF que ilustren la evolucion de los indices a lo largo del periodo de estudio.

## 2. Descripcion del Area y Periodo de Estudio

### 2.1. Localizacion Geografica y Caracteristicas del Territorio

El area de estudio se localiza en la **Comuna de Chaiten**, ubicada en la Provincia de Palena, Region de Los Lagos, en el extremo norte de la Patagonia chilena. Esta comuna se situa en una zona de transicion geografica donde confluyen los Andes patagonicos, los fiordos australes y los bosques templados lluviosos, configurando un paisaje de extraordinaria belleza pero tambien de alta complejidad en terminos de amenazas naturales.

La ciudad de Chaiten, capital comunal, se emplaza en una angosta planicie costera al pie del volcan homonymous, en la ribera sur del estuario del rio Blanco. Esta ubicacion, que le confiere un escenario paisajistico privilegiado, la expone simultaneamente a multiples amenazas: volcanismo activo, inundaciones fluviales, remocion en masa y marejadas.

Cuadro 1: Caracteristicas geograficas y administrativas del area de estudio

Parametro	Valor
Comuna	Chaiten
Provincia	Palena
Region	Los Lagos (X Region)
Coordenadas del centro urbano	42 54' S, 72 42' W
Bounding Box del analisis	[-72.76, -42.96, -72.64, -42.86]
Sistema de referencia	EPSG:4326 (WGS84)
Superficie aproximada	120 km <sup>2</sup>
Rango altitudinal	0 a 500 msnm
Clima	Templado lluvioso
Precipitacion media anual	Mayor a 3,000 mm

### 2.2. La Erupcion de 2008: Un Evento que Cambio la Historia de Chaiten

Para comprender cabalmente la relevancia de estudiar los cambios territoriales en Chaiten, es indispensable conocer el evento que marco un antes y un despues en la historia de esta ciudad: la erupcion del volcan Chaiten iniciada el 2 de mayo de 2008.

### 2.2.1. Cronologia del Desastre

El volcan Chaiten habia permanecido en silencio durante aproximadamente 9,400 anios. Ningun habitante actual de la zona tenia memoria de actividad volcanica, y el volcan no figuraba entre aquellos considerados de alta prioridad para el monitoreo. Sin embargo, en la madrugada del 2 de mayo de 2008, una violenta erupcion explosiva sorprendio a la poblacion.

Los eventos se sucedieron con dramatica rapidez:

- **2 de mayo de 2008:** Inicio de la erupcion con columnas de ceniza que alcanzaron 20 km de altura. Inmediatamente se ordena la evacuacion de la ciudad.
- **3-6 de mayo:** En menos de 48 horas, los aproximadamente 4,500 habitantes de Chaiten son evacuados a ciudades cercanas como Puerto Montt, Futaleufu y Chilenotico. La operacion de evacuacion es considerada un exito logistico.
- **Mayo-Junio de 2008:** La erupcion continua con fases explosivas y efusivas. El rio Blanco, represado por material volcanico, cambia dramaticamente su cauce e inunda el sector norte de la ciudad.
- **Febrero de 2009:** Un lahar destruye gran parte del casco historico. Se estima que un 80 % de las viviendas sufren dano significativo.
- **2010:** El gobierno decreta que la ciudad no sera reconstruida en su ubicacion original y propone trasladarla a Santa Barbara, 10 km al norte.
- **2011 en adelante:** Contra las decisiones gubernamentales, los habitantes comienzan a retornar espontaneamente e inician por cuenta propia la reconstruccion. En 2012, el gobierno reconoce esta realidad y comienza a apoyar la reconstruccion in situ.

### 2.2.2. Situacion Actual y Proceso de Reconstruccion

Quince anios despues de la erupcion, Chaiten continua en un proceso de reconstruccion y reinversion. La poblacion ha retornao gradualmente, aunque sin alcanzar los niveles pre-erupcion. La ciudad ha sido rediseñada para convivir con el riesgo volcanico, con nuevas obras de mitigacion en el rio Blanco y planes de evacuacion actualizados.

Este prolongado proceso de transformacion urbana constituye un caso de estudio excepcional para la teledeteccion: permite observar como una ciudad emerge, crece y se transforma en el contexto de recuperacion de un desastre natural, todo ello documentado por el registro continuo de los satelites Sentinel-2.

### 2.3. Justificacion de la Selección del Area de Estudio

La eleccion de Chaiten como area de estudio responde a un conjunto de criterios tanto cientificos como practicos:

1. **Dinamismo territorial:** A diferencia de ciudades con patrones de crecimiento graduales y predecibles, Chaiten exhibe transformaciones rapidas y significativas asociadas a la reconstruccion, lo que genera señales claras y detectables en las imagenes satelitales.
2. **Escala apropiada:** Con aproximadamente  $120 \text{ km}^2$  de superficie, el area cumple con los requisitos del laboratorio ( $100-500 \text{ km}^2$ ) y permite un procesamiento computacionalmente manejable sin sacrificar riqueza de detalle.
3. **Diversidad de coberturas:** El area incluye zona urbana, bosque nativo, matorrales, cuerpos de agua (rio, estuario), suelo desnudo volcanico y areas de transicion, lo que permite probar los algoritmos de clasificacion en multiples contextos.

4. **Disponibilidad de imagenes:** Pese a la alta pluviosidad de la zona, los meses de verano ofrecen ventanas de baja nubosidad suficientes para obtener imagenes de calidad aceptable en cada año del periodo de estudio.
5. **Relevancia para la gestion publica:** Los resultados de este tipo de estudios pueden contribuir directamente a la toma de decisiones en materia de planificacion territorial, monitoreo ambiental y gestion del riesgo en la comuna.

## 2.4. Caracterizacion del Periodo de Analisis

El analisis abarca el quinquenio 2020-2024, un periodo seleccionado estrategicamente por las siguientes razones:

Cuadro 2: Parametros temporales del analisis

Parametro	Valor/Descripcion
Rango temporal	Enero 2020 - Febrero 2024
Duracion	5 años
Epoca del año	Verano austral (Enero-Febrero)
Numero de compositos	5 (uno por año)
Criterio de nubosidad	Maximo 10 % de cobertura
Sensor utilizado	Sentinel-2 MSI
Nivel de producto	Level-2A (reflectancia de superficie)

La restriccion al periodo estival se justifica por multiples razones tecnicas y cientificas:

- **Minimizacion de la cobertura nubosa:** Chaiten recibe mas de 3,000 mm de precipitacion anual, concentrada principalmente entre otono e invierno. El verano ofrece las mejores condiciones de cielo despejado.
- **Maximizacion de la señal vegetativa:** Durante el verano, la vegetacion templada alcanza su maximo vigor fotosintetico, lo que amplifica las diferencias entre areas vegetadas y no vegetadas en los indices espectrales.
- **Optimas condiciones de iluminacion:** Los angulos solares mas elevados del verano reducen las sombras topograficas y mejoran la calidad radiometrica de las imagenes.
- **Consistencia fenologica interanual:** Al comparar invariablemente imagenes de la misma epoca del año, se minimizan las diferencias atribuibles a cambios estacionales, permitiendo aislar cambios reales de cobertura.

## 3. Metodologia Aplicada

### 3.1. Vision General del Flujo de Trabajo

La metodologia desarrollada sigue un flujo de trabajo estructurado en cinco fases claramente diferenciadas, cada una implementada mediante scripts de Python que garantizan la reproducibilidad del analisis:

1. **Fase de Adquisicion:** Descarga automatizada de imagenes Sentinel-2 desde el Copernicus Data Space, junto con datos vectoriales complementarios de fuentes abiertas.
2. **Fase de Preprocesamiento:** Calculo de indices espectrales (NDVI, NDBI, NDWI, BSI) para cada imagen de la serie temporal.

3. **Fase de Detección:** Aplicacion de dos algoritmos de detección de cambios que identifican y clasifican las transformaciones ocurridas.
4. **Fase de Cuantificación:** Analisis zonal que traduce los resultados en metricas comprensibles (hectareas, porcentajes).
5. **Fase de Visualizacion:** Generacion de productos graficos estaticos, animaciones temporales y un dashboard interactivo.

### 3.2. Adquisicion y Fuentes de Datos

#### 3.2.1. Descripcion del Satelite Sentinel-2

Sentinel-2 es una constelacion de dos satelites gemelos (Sentinel-2A y Sentinel-2B) operados por la Agencia Espacial Europea como parte del programa Copernicus de la Union Europea. Estos satelites fueron disenados especificamente para el monitoreo terrestre y ofrecen caracteristicas ideales para estudios de cambio de uso de suelo:

- **Alta resolucion espacial:** Bandas en el visible y NIR con 10 metros de resolucion, suficiente para detectar cambios a escala de manzana urbana.
- **Amplio rango espectral:** 13 bandas desde el visible hasta el infrarrojo de onda corta, permitiendo calcular multiples indices espectrales.
- **Alta frecuencia temporal:** Tiempo de revisita de 5 dias con ambos satelites, aumentando la probabilidad de obtener imagenes libres de nubes.
- **Acceso gratuito y abierto:** Todos los productos estan disponibles sin costo a traves del Copernicus Data Space Ecosystem.

#### 3.2.2. Bandas Espectrales Utilizadas

Para este estudio se utilizaron selectivamente cinco bandas del sensor MSI (Multi-Spectral Instrument):

Cuadro 3: Bandas Sentinel-2 utilizadas y su rol en el calculo de indices

Banda	Nombre	Longitud de Onda	Resolucion	Indices donde participa
B02	Azul	490 nm (492.4)	10 m	BSI
B03	Verde	560 nm (559.8)	10 m	NDWI
B04	Rojo	665 nm (664.6)	10 m	NDVI, BSI
B08	NIR (broad)	842 nm (832.8)	10 m	NDVI, NDBI, NDWI, BSI
B11	SWIR1	1610 nm (1613.7)	20 m	NDBI, BSI

#### 3.2.3. Datos Vectoriales de Apoyo

Complementariamente a las imagenes satelitales, se incorporaron capas vectoriales de diversas fuentes que enriquecen el analisis y la visualizacion:

Cuadro 4: Capas vectoriales auxiliares incorporadas al proyecto

Capa	Fuente	Formato	Proposito
Limite comunal	IDE Chile / GADM	GeoJSON	Delimitacion del area de estudio
Red vial	OpenStreetMap	GeoJSON	Contextualizacion urbana
Edificaciones	OpenStreetMap	GeoJSON	Referencia de huella urbana
Zonas de analisis	Generadas internamente	GeoJSON	Unidades para estadisticas zonales

### 3.3. Calculo e Interpretacion de Indices Espectrales

Los indices espectrales constituyen transformaciones matematicas de las bandas originales que realzan fenomenos especificos de la superficie terrestre. A continuacion se describe cada indice utilizado, su fundamento fisico y criterios de interpretacion.

#### 3.3.1. NDVI: Indice de Vegetacion de Diferencia Normalizada

El NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) es el indice espectral mas utilizado a nivel mundial para estimar la densidad y el estado de salud de la vegetacion. Su fundamento radica en el comportamiento espectral caracteristico de las plantas verdes: absorben fuertemente la radiacion roja (para la fotosintesis) mientras reflejan intensamente la radiacion infrarroja cercana (por la estructura celular de las hojas).

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Rojo}}{\rho_{NIR} + \rho_{Rojo}} = \frac{B08 - B04}{B08 + B04} \quad (1)$$

El NDVI produce valores entre -1 y +1. En la practica, los valores tipicos para diferentes coberturas son:

- **Valores negativos** ( $NDVI < 0$ ): Agua, nubes, nieve. El agua absorbe fuertemente el infrarrojo, produciendo valores negativos.
- **Valores bajos** ( $0 < NDVI < 0,2$ ): Suelo desnudo, rocas, superficies urbanas. Materiales inertes con similar reflectancia en rojo y NIR.
- **Valores moderados** ( $0,2 < NDVI < 0,5$ ): Vegetacion dispersa, pastizales, cultivos en etapas iniciales o vegetacion estresada.
- **Valores altos** ( $NDVI > 0,5$ ): Vegetacion densa y saludable, bosques, cultivos en pleno desarrollo.

#### 3.3.2. NDBI: Indice de Edificacion de Diferencia Normalizada

El NDBI (Normalized Difference Built-up Index) fue diseñado para discriminar areas urbanas y superficies construidas. Su logica se basa en que materiales como el concreto, asfalto y techos metalicos presentan mayor reflectancia en el infrarrojo de onda corta (SWIR) que en el infrarrojo cercano (NIR), un comportamiento opuesto al de la vegetacion.

$$NDBI = \frac{\rho_{SWIR} - \rho_{NIR}}{\rho_{SWIR} + \rho_{NIR}} = \frac{B11 - B08}{B11 + B08} \quad (2)$$

La interpretacion del NDBI es la siguiente:

- **Valores negativos:** Vegetacion, agua. Coberturas donde el NIR domina sobre el SWIR.
- **Valores cercanos a cero:** Mezcla de coberturas o suelo desnudo.

- **Valores positivos:** Areas urbanas, caminos pavimentados, techos. Superficies impermeables tipicas de entornos construidos.

### 3.3.3. NDWI: Indice de Agua de Diferencia Normalizada

El NDWI (Normalized Difference Water Index) facilita la identificacion de cuerpos de agua y areas con alto contenido de humedad. Explota el fuerte contraste entre la alta reflectancia del agua en el verde y su casi total absorcion en el infrarrojo cercano.

$$NDWI = \frac{\rho_{Verde} - \rho_{NIR}}{\rho_{Verde} + \rho_{NIR}} = \frac{B03 - B08}{B03 + B08} \quad (3)$$

En la practica:

- **Valores altos ( $NDWI > 0,3$ ):** Cuerpos de agua abiertos y profundos.
- **Valores moderados ( $0,1 < NDWI < 0,3$ ):** Humedales, suelos saturados, vegetacion acuatica.
- **Valores bajos o negativos:** Superficies terrestres secas.

### 3.3.4. BSI: Indice de Suelo Desnudo

El BSI (Bare Soil Index) permite destacar areas de suelo desnudo, tierras agricolas sin cultivo, o superficies degradadas. Combina cuatro bandas para maximizar el contraste entre suelo expuesto y otras coberturas.

$$BSI = \frac{(\rho_{SWIR} + \rho_{Rojo}) - (\rho_{NIR} + \rho_{Azul})}{(\rho_{SWIR} + \rho_{Rojo}) + (\rho_{NIR} + \rho_{Azul})} \quad (4)$$

## 3.4. Metodos de Deteccion de Cambios

La deteccion de cambios en imagenes satelitales puede abordarse mediante multiples estrategias. En este trabajo se implementaron dos metodos complementarios que representan distintos enfoques metodologicos.

### 3.4.1. Metodo 1: Diferencia de Indices (Analisis de Vectores de Cambio Simplificado)

Este metodo, el mas intuitivo y ampliamente utilizado, consiste simplemente en calcular la diferencia aritmetica del NDVI entre la fecha final y la fecha inicial:

$$\Delta NDVI = NDVI_{2024} - NDVI_{2020} \quad (5)$$

La logica es directa: donde el NDVI disminuyo significativamente, hubo perdida de vegetacion; donde aumento, hubo ganancia. El desafio radica en definir que constituye un cambio “significativo”, lo cual requiere establecer un umbral que separe el cambio real del ruido (variabilidad atmosferica, diferencias fenologicas residuales, errores de registro).

Tras revision de la literatura y experimentacion empirica, se establecio un umbral de  $\pm 0,15$ :

- $\Delta NDVI < -0,15$ : **Perdida de vegetacion** (codigo -1)
- $-0,15 \leq \Delta NDVI \leq 0,15$ : **Sin cambio significativo** (codigo 0)
- $\Delta NDVI > 0,15$ : **Ganancia de vegetacion** (codigo +1)

### 3.4.2. Metodo 2: Clasificacion Multiindice Post-Clasificacion

El segundo metodo busca superar la principal limitacion del anterior: su incapacidad para distinguir el *tipo* de cambio. Una reduccion del NDVI puede deberse a urbanizacion, pero tambien a incendios, sequia, enfermedades forestales o simplemente variabilidad natural.

Este metodo combina informacion del NDVI, NDBI y NDWI para inferir las transiciones mas probables entre clases de cobertura:

Cuadro 5: Reglas de decision para la clasificacion multiindice

Clase de Cambio	Logica de Decision
Urbanizacion	El pixel era vegetacion en 2020 ( $NDVI_{2020} > 0,3$ ), ahora muestra caracter urbano ( $NDBI_{2024} > 0$ ), y perdió NDVI ( $\Delta NDVI < -0,15$ )
Perdida de Vegetacion	Perdió NDVI ( $\Delta NDVI < -0,15$ ) pero no cumple criterios de urbanización
Ganancia de Vegetacion	Ganó NDVI ( $\Delta NDVI > 0,15$ )
Nuevo Cuerpo de Agua	No era agua ( $NDWI_{2020} < 0,1$ ) y ahora es agua ( $NDWI_{2024} > 0,1$ )
Perdida de Agua	Era agua ( $NDWI_{2020} > 0,1$ ) y ya no es agua ( $NDWI_{2024} < 0,1$ )
Sin Cambio	No cumple ninguno de los criterios anteriores

### 3.5. Fundamento de los Umbrales Seleccionados

La seleccion de umbrales es un aspecto critico en cualquier analisis de deteccion de cambios. Umbrales muy restrictivos produciran omisiones (cambios reales no detectados); umbrales muy laxos generaran falsas alarmas. Los valores utilizados en este trabajo se fundamentan tanto en la literatura cientifica como en la inspeccion visual de los datos:

Cuadro 6: Justificacion de los umbrales empleados

Parametro	Valor	Fundamento
NDVI vegetacion	0.3	Valor clasico propuesto por Rouse et al. (1974). Separa vegetacion activa de otras coberturas.
NDBI urbano	0.0	Límite teorico: valores positivos indican predominio de SWIR sobre NIR.
Cambio minimo	0.15	Cambios menores podrían atribuirse a variabilidad atmosferica residual o diferencias en angulo de iluminacion.
NDWI agua	0.1	Umbra conservador para minimizar confusion con sombras.

### 3.6. Analisis Zonal y Cuantificacion de Cambios

Los resultados raster de detección de cambios, expresados en pixeles, deben traducirse a metricas comprensibles para la toma de decisiones. Para ello se implemento un analisis zonal que:

1. Divide el area de estudio en zonas geograficas (grilla regular o unidades administrativas).
2. Cuenta el numero de pixeles de cada clase de cambio dentro de cada zona.
3. Convierte los conteos a superficie en hectareas, considerando que cada pixel de 10x10 m cubre 0.01 ha.
4. Calcula porcentajes respecto al area total de cada zona.

Este analisis se implemento mediante la biblioteca `rasterstats` de Python, que permite calcular estadisticas zonales de manera eficiente sobre rasters de gran tamaño.

## 4. Resultados y Hallazgos

### 4.1. Panorama General de los Cambios Detectados

El analisis de los cambios ocurridos en la comuna de Chaiten entre 2020 y 2024 revela una dinamica territorial caracterizada por dos tendencias principales: una continua expansion del area urbana asociada al proceso de reconstruccion, y una reduccion paralela de la cobertura vegetal en las areas circundantes a la ciudad.

Estos patrones, consistentes con las expectativas derivadas del contexto historico post-erupcion, se cuantifican a continuacion mediante los resultados de ambos metodos de deteccion.

### 4.2. Resultados del Metodo 1: Diferencia de NDVI

La aplicacion del metodo de diferencia de indices sobre el periodo 2020-2024 arrojo los siguientes resultados:

Cuadro 7: Distribucion de cambios segun Metodo 1 (Diferencia de NDVI)

Categoría	Pixeles	Porcentaje	Superficie (ha)
Perdida de vegetacion	10,785	26.96 %	107.85
Sin cambio significativo	28,379	70.95 %	283.79
Ganancia de vegetacion	836	2.09 %	8.36
<b>Total</b>	<b>40,000</b>	<b>100.00 %</b>	<b>400.00</b>

El resultado mas llamativo es que **mas de una cuarta parte del area de estudio** (26.96 %) experimento una reduccion significativa del NDVI durante el quinquenio analizado. Esto equivale a casi 108 hectareas de perdida de vigor vegetal.

Por otra parte, la ganancia de vegetacion fue marginal, representando apenas el 2.09 % del area (8.36 ha). Esto sugiere que el proceso de regeneracion natural de la vegetacion en las areas afectadas por la erupcion de 2008 aun es lento y limitado.

La diferencia media del NDVI para toda el area fue de **-0.0802**, confirmando la tendencia general hacia la reduccion de la vegetacion.

### 4.3. Resultados del Metodo 2: Clasificacion Multiindice

El metodo de clasificacion multiindice permitio desagregar la perdida de vegetacion segun su causa mas probable:

Cuadro 8: Distribucion de cambios segun Metodo 2 (Clasificacion Multiindice)

Clase de Cambio	Pixeles	Porcentaje	Superficie (ha)
Sin Cambio	28,379	70.95 %	283.79
Urbanizacion	1,734	4.33 %	17.34
Perdida de Vegetacion (otras causas)	9,051	22.63 %	90.51
Ganancia de Vegetacion	836	2.09 %	8.36
Nuevos Cuerpos de Agua	0	0.00 %	0.00
Perdida de Cuerpos de Agua	0	0.00 %	0.00
<b>Total</b>	40,000	100.00 %	400.00

Este metodo revela un hallazgo fundamental: de las 107.85 hectareas que perdieron vegetacion segun el Metodo 1, **17.34 hectareas (16 %) corresponden especificamente a procesos de urbanizacion**, es decir, a la conversion de areas previamente vegetadas en superficies construidas o impermeabilizadas.

Las restantes 90.51 hectareas de perdida vegetal (22.63 % del area) responden a otras causas no directamente asociadas a la expansion urbana, posiblemente incluyendo degradacion natural, efectos climaticos, o dinamicas propias de la sucesion ecológica post-erupcion.

#### 4.4. Analisis de la Evolucion Temporal

Para comprender la dinamica temporal de los cambios, se analizo la evolucion anual de los principales indicadores:

Cuadro 9: Evolucion temporal de indicadores espectrales y de cobertura (2020-2024)

Anio	NDVI medio	NDBI medio	Cobertura Vegetal	Area Urbana
2020	0.42	-0.10	65.0 %	15.0 %
2021	0.40	-0.08	62.0 %	17.0 %
2022	0.38	-0.06	58.0 %	20.0 %
2023	0.37	-0.04	55.0 %	22.0 %
2024	0.35	-0.02	52.0 %	25.0 %

Las tendencias son claras y consistentes anio tras anio:

- El **NDVI medio disminuyo de 0.42 a 0.35**, una reduccion del 16.7 % en solo cinco anios. Esta caída refleja tanto la perdida directa de vegetacion como la posible degradacion del vigor de la vegetacion remanente.
- El **NDBI medio aumento de -0.10 a -0.02**, acercandose progresivamente al umbral de caracter urbano. Aunque aun prevalece el caracter vegetal (NDBI negativo), la tendencia apunta hacia una mayor presencia de superficies impermeables.
- La **cobertura vegetal estimada cayo de 65 % a 52 %**, una reduccion de 13 puntos porcentuales.
- El **area urbana estimada crecio de 15 % a 25 %**, un incremento de 10 puntos porcentuales, duplicando casi la proporcion inicial.

#### 4.5. Comparación y Complementariedad de los Métodos

La aplicación paralela de dos métodos de detección permitió evaluar sus respectivas fortalezas y debilidades:

Cuadro 10: Comparación de los métodos de detección de cambios implementados

Criterio	Método 1	Método 2
Complejidad conceptual	Baja	Media
Número de parámetros	1	4
Clases de cambio detectadas	3	6
Capacidad de tipificación	Limitada (solo vegetación)	Alta (múltiples transiciones)
Velocidad de procesamiento	Muy alta	Alta
Facilidad de interpretación	Muy alta	Media
Sensibilidad a errores de umbral	Media	Alta

La principal conclusión es que **ambos métodos son complementarios**: el Método 1 ofrece una visión rápida y robusta del cambio total de vegetación, mientras que el Método 2 permite desagregar ese cambio según su naturaleza específica (urbanización vs. otras causas). En aplicaciones operacionales, se recomienda utilizar ambos y contrastar sus resultados.

### 5. Discusión e Interpretación

#### 5.1. Interpretación de los Patrones Espaciales y Temporales

Los resultados obtenidos revelan un territorio en activa transformación, donde el proceso de reconstrucción urbana post-erupción continua siendo el principal motor de cambio. La pérdida de vegetación y la expansión del área urbana son fenómenos correlacionados que responden a una dinámica común: la progresiva recuperación de Chaitén como centro urbano funcional tras el desastre de 2008.

Es notable que, quince años después de la erupción, el proceso de reconstrucción sigue generando cambios detectables en las imágenes satelitales. Esto evidencia tanto la magnitud del desastre original como la resiliencia de la comunidad que, contra todo pronóstico inicial, decidió reconstruir su ciudad en el mismo emplazamiento.

#### 5.2. Limitaciones del Estudio y Consideraciones Metodológicas

Como todo análisis de teledetección, este estudio presenta limitaciones que deben considerarse al interpretar los resultados:

1. **Resolución temporal limitada:** El enfoque anual impide detectar cambios estacionales o eventos de corta duración como incendios o inundaciones temporales.
2. **Ausencia de validación terrestre:** No se realizó verificación de campo de los cambios detectados, lo que impide cuantificar formalmente la exactitud temática de las clasificaciones.
3. **Sensibilidad a umbrales:** Los resultados dependen de los umbrales seleccionados, que aunque fundamentados en la literatura, podrían optimizarse mediante calibración local.
4. **Confusión espectral residual:** Algunos materiales artificiales pueden confundirse con suelo desnudo natural, y viceversa, limitando la precisión de la distinción urbanización/-degradación.

### 5.3. Validez y Aplicabilidad de los Resultados

A pesar de las limitaciones señaladas, los resultados presentan consistencia interna (concordancia entre métodos) y externa (coherencia con el contexto histórico conocido), lo que respalda su validez general. La metodología desarrollada es transferible a otras áreas de Chile y puede constituir una herramienta útil para el monitoreo territorial operacional.

## 6. Conclusiones

A partir del trabajo realizado, se derivan las siguientes conclusiones principales:

1. Se diseñó e implementó exitosamente un **flujo de trabajo integral** para la detección de cambios urbanos basado en imágenes Sentinel-2, abarcando desde la adquisición automatizada de datos hasta la visualización interactiva de resultados.
2. La aplicación de **dos métodos complementarios** de detección de cambios demostró ser una estrategia robusta: el Método 1 (diferencia de NDVI) proporciona una cuantificación rápida del cambio total de vegetación, mientras que el Método 2 (clasificación multiíndice) permite tipificar específicamente los procesos de urbanización.
3. Entre 2020 y 2024, el área de estudio experimentó una **pérdida de vegetación del 26.96 % (107.85 ha)**, de la cual un **4.33 % (17.34 ha)** corresponde a **urbanización** y el restante 22.63 % a otras formas de degradación vegetal.
4. Los indicadores espectrales muestran **tendencias claras y sostenidas**: el NDVI medio disminuyó 16.7 % mientras que el área urbana estimada prácticamente se duplicó, pasando de 15 % a 25 % de la superficie estudiada.
5. El **dashboard interactivo** desarrollado con Streamlit constituye una herramienta accesible para que usuarios no especializados exploren los resultados mediante mapas, gráficos y opciones de descarga de datos.
6. La metodología desarrollada es **reproducible y transferible**, pudiendo aplicarse a otras comunas chilenas para el monitoreo sistemático de cambios territoriales.

## 7. Referencias Bibliográficas

1. Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., & Deering, D.W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *NASA Special Publication*, 351, 309-317.
2. Zha, Y., Gao, J., & Ni, S. (2003). Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 24(3), 583-594.
3. Zhu, Z. (2017). Change detection using Landsat time series: A review of frequencies, pre-processing, algorithms, and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 130, 370-384.
4. Kennedy, R.E., Yang, Z., & Cohen, W.B. (2010). Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series. *Remote Sensing of Environment*, 114(12), 2897-2910.
5. SERNAGEOMIN (2008). Erupción del volcán Chaitén: Informes técnicos y cronología del evento. Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile.
6. Copernicus Data Space Ecosystem. Disponible en: <https://dataspace.copernicus.eu/>

7. IDE Chile - Infraestructura de Datos Geoespaciales de Chile. Disponible en: <https://www.ide.cl/>

## A. Estructura del Repositorio de Código

El código fuente completo del proyecto se encuentra organizado de la siguiente manera:

```
Lab2GeoInformatica/
++- data/
|   +- raw/sentinel_series/
|   +- processed/
|   +- vector/
++- notebooks/
|   +- 01_descarga_datos.ipynb
|   +- 02_calculo_indices.ipynb
|   +- 03_deteccion_cambios.ipynb
|   +- 04_analisis_zonal.ipynb
|   +- 05_visualizacion.ipynb
++- scripts/
|   +- download_sentinel_series.py
|   +- calculate_indices.py
|   +- detect_changes.py
|   +- zonal_analysis.py
|   +- create_animation.py
++- app/
|   +- app.py
++- outputs/
|   +- animacion_ndvi.gif
|   +- animacion_ndbi.gif
++- docs/
|   +- informe_final.tex
++- requirements.txt
++- README.md
```