



## **Laboratorio 2**

**Análisis Multitemporal de Cambios de Uso de Suelo**

**Comuna de Peñaflor (2018-2024)**

Estudiante: Byron Caices

Curso: Tópico de Especialidad: Geoinformática

Profesor: Francisco Parra

29 de Enero, 2026

# Tabla de contenidos

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Contexto y Justificación . . . . .	1
1.2. Área de Estudio . . . . .	1
1.3. Período de Estudio . . . . .	1
1.4. Objetivos . . . . .	2
<b>2. Metodología</b>	<b>2</b>
2.1. Diseño General . . . . .	2
2.2. Fase 1: Adquisición de Datos Satelitales . . . . .	3
2.3. Fase 2: Cálculo de Índices Espectrales . . . . .	3
2.4. Fase 3: Detección de Cambios . . . . .	4
2.5. Fase 4: Análisis Zonal . . . . .	4
2.6. Fase 5: Dashboard Interactivo . . . . .	5
2.7. Validación . . . . .	5
<b>3. Resultados</b>	<b>6</b>
3.1. Adquisición y Calidad de Datos . . . . .	6
3.2. Evolución de Índices Espectrales 2018-2024 . . . . .	6
3.3. Detección de Cambios por Método . . . . .	6
3.4. Análisis Zonal: Hotspots de Transformación . . . . .	7
3.5. Evolución Temporal . . . . .	7
<b>4. Discusión</b>	<b>8</b>
4.1. Interpretación de Resultados . . . . .	8
4.2. Validación de Resultados . . . . .	8
4.3. Comparación con Estudios Previos . . . . .	9
4.4. Limitaciones del Estudio . . . . .	9
4.5. Implicancias para Gestión Territorial . . . . .	9
4.6. Recomendaciones . . . . .	10

<b>5. Conclusiones</b>	<b>10</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>13</b>
<b>Anexos</b>	<b>14</b>

# **1. Introducción**

## **1.1. Contexto y Justificación**

La comuna de Peñaflor, ubicada en el sector suroccidente de la Región Metropolitana de Chile ( $33^{\circ}30' - 33^{\circ}40' S$ ,  $70^{\circ}50' - 71^{\circ}00' O$ ), constituye un caso paradigmático de transformación territorial periurbana. Con una superficie de  $202 \text{ km}^2$  y localizada a 30 km de Santiago, la comuna ha experimentado un crecimiento poblacional del 18 % entre 2002-2017 (Instituto Nacional de Estadísticas, 2018), impulsado por su conectividad vial (Autopista del Sol, Ruta 78) y menor costo del suelo respecto a la capital.

El Plan Regulador Comunal vigente (2015) proyecta un crecimiento urbano de 0.5 % anual, pero carece de verificación sistemática mediante datos satelitales de alta resolución temporal. Esta brecha entre planificación y realidad territorial motiva el presente estudio, que utiliza teledetección satelital para cuantificar cambios efectivos de uso de suelo.

## **1.2. Área de Estudio**

Peñaflor presenta características mixtas de uso de suelo: áreas urbanas consolidadas (25 %), actividad agrícola (35 %), zonas industriales (15 %) y vegetación natural (25 %). Su ubicación estratégica en el valle del río Maipo, con topografía plana (300-400 m.s.n.m.) y uso histórico agrícola (hortalizas, frutales, viñedos), la hace especialmente vulnerable a presión inmobiliaria.

**Coordenadas del área de estudio:** Oeste:  $-70.96^{\circ}$ , Sur:  $-33.68^{\circ}$ , Este:  $-70.82^{\circ}$ , Norte:  $-33.54^{\circ}$  (datum WGS84).

## **1.3. Período de Estudio**

El análisis abarca el período 2018-2024 (6 años) con cuatro ventanas temporales bienales correspondientes a veranos australes (diciembre-febrero). Esta selección temporal maximiza la respuesta espectral de vegetación, minimiza nubosidad (<5 %), y

captura transformaciones asociadas a expansión inmobiliaria post-pandemia COVID-19 y efectos de la megasequía 2010-2022 que afectó a Chile central (Garreaud et al., 2020).

## 1.4. Objetivos

**Objetivo General:** Cuantificar los cambios de uso de suelo en Peñaflor (2018-2024) mediante teledetección Sentinel-2, análisis espacial y visualización interactiva.

**Objetivos Específicos:**

1. Adquirir y procesar imágenes Sentinel-2 multitemporales con <5 % de nubosidad.
2. Calcular índices espectrales (NDVI, NDBI, NDWI, BSI) para caracterización de coberturas.
3. Implementar 3 métodos de detección de cambios (diferenciación, Z-Score, clasificación multicriterio).
4. Realizar análisis zonal mediante grilla sistemática de  $10 \times 10$  celdas.
5. Desarrollar dashboard web interactivo (Streamlit) para visualización de resultados.
6. Validar resultados con Google Earth y datos del Plan Regulador Comunal.

## 2. Metodología

### 2.1. Diseño General

El proyecto se estructuró en cinco fases secuenciales: (1) Adquisición de imágenes Sentinel-2, (2) Cálculo de índices espectrales, (3) Detección de cambios, (4) Análisis zonal, y (5) Dashboard interactivo.

## 2.2. Fase 1: Adquisición de Datos Satelitales

**Fuente de datos:** Imágenes Sentinel-2 nivel 2A (reflectancia de superficie) de la colección COPERNICUS/S2\_SR\_HARMONIZED, descargadas mediante Google Earth Engine.

### Criterios de selección:

- **Cobertura de nubes:** <5 % sobre Peñaflor (máximo 20 % cuando no hay disponibilidad).
- **Estacionalidad:** Veranos australes (enero-febrero) de 2018, 2020, 2022 y 2024.
- **Bandas espectrales:** B2 (Blue, 490 nm), B3 (Green, 560 nm), B4 (Red, 665 nm), B8 (NIR, 842 nm), B11 (SWIR1, 1610 nm), B12 (SWIR2, 2190 nm).
- **Resolución espacial:** 10 m para bandas visibles e infrarrojo cercano, 20 m para infrarrojo de onda corta (remuestreado a 10 m).

**Pre-procesamiento:** Composición mediana de imágenes del período, máscara de nubes basada en banda QA60 (bits 10 y 11), recorte espacial al área de estudio, y conversión a GeoTIFF comprimido.

## 2.3. Fase 2: Cálculo de Índices Espectrales

Se calcularon cuatro índices espectrales normalizados para caracterizar coberturas del suelo (fórmulas detalladas en Anexo D):

**NDVI (Normalized Difference Vegetation Index):** Identifica vegetación activa mediante contraste NIR/Red. Valores altos ( $>0.3$ ) indican vegetación densa.

**NDBI (Normalized Difference Built-up Index):** Detecta áreas construidas mediante contraste SWIR1/NIR. Valores positivos indican superficies impermeables.

**NDWI (Normalized Difference Water Index):** Identifica cuerpos de agua mediante contraste Green/NIR. Valores  $>0.1$  indican agua superficial.

**BSI (Bare Soil Index):** Detecta suelo desnudo mediante combinación de bandas SWIR1, Red, NIR y Blue. Valores altos indican suelo expuesto sin vegetación.

**Procesamiento técnico:** Detección automática de formato de entrada (DN 0-10000 vs. reflectancia 0-1), escalamiento a reflectancia cuando es necesario, aplicación de epsilon ( $1e-10$ ) para evitar división por cero, y asignación de valor nodata (-9999) a píxeles inválidos. Salida en formato GeoTIFF multi-banda (4 bandas por año), tipo de dato Float32.

## 2.4. Fase 3: Detección de Cambios

Se implementaron tres métodos complementarios para identificar transformaciones urbanas:

**Método 1 - Diferenciación Simple:** Resta aritmética de índices entre fechas ( $\Delta = \text{Índice}_{2024} - \text{Índice}_{2018}$ ). Clasificación: pérdida de vegetación si  $\Delta\text{NDVI} < -0,15$ , ganancia si  $\Delta\text{NDVI} > 0,15$ , sin cambio en rango intermedio. Umbral de 0.15 basado en literatura científica para zonas mediterráneas (Pettorelli et al., 2005) y variabilidad estacional local (desviación estándar NDVI  $\approx 0.23$ ).

**Método 2 - Clasificación Multicriterio:** Combinación de NDVI, NDBI y NDWI mediante reglas lógicas aplicadas en cascada. Regla de urbanización:  $\text{NDVI}_{2018} > 0,3$  (era vegetación densa) AND  $\text{NDBI}_{2024} > 0$  (ahora es área urbana) AND ( $\Delta\text{NDBI} > 0,15$ ). Otras reglas para pérdida/ganancia de vegetación, cambios de agua. Genera mapa categórico con 6 clases de cambio.

**Método 3 - Z-Score Normalizado:** Detección de anomalías estadísticas respecto al histórico.  $Z\text{-score} = (\text{NDVI}_{2024} - \mu_{hist}) / (\sigma_{hist} + \epsilon)$ , donde  $\mu_{hist}$  es la media de 2018-2020-2022 y  $\sigma_{hist}$  la desviación estándar. Clasificación: anomalía negativa si  $Z < -2$  (urbanización probable), normal si  $|Z| \leq 2$ , anomalía positiva si  $Z > +2$  (revegetación).

## 2.5. Fase 4: Análisis Zonal

**Grilla de análisis:** Se creó una malla sistemática de  $10 \times 10$  celdas (100 zonas totales,  $2.02 \text{ km}^2$  por celda) cubriendo el área de estudio. Justificación: garantiza cobertura completa sin gaps, facilita comparaciones inter-zonales, y mitiga el Problema

de Unidad de Área Modificable (MAUP) (Openshaw, 1984).

**Estadísticas zonales:** Para cada celda se calcularon: área urbanizada (ha), pérdida/ganancia de vegetación (ha), promedios de índices espectrales, Índice de Transformación (IT) compuesto normalizado 0-100. IT pondera urbanización (40 %), pérdida vegetativa (35 %) y cambio NDBI (25 %).

**Identificación de hotspots:** Ranking descendente por urbanización y por IT. Top 10 zonas clasificadas como críticas ( $IT > 0,75$ ). Análisis de autocorrelación espacial para detectar clusters de transformación.

## 2.6. Fase 5: Dashboard Interactivo

Aplicación web desarrollada con Streamlit integrando: (1) Panel de métricas (4 KPIs con deltas porcentuales), (2) Mapa interactivo Folium con capa coroplética (esquema YlOrRd) y tooltips personalizados, (3) Filtros dinámicos temporales y espaciales en sidebar, (4) Gráficos Plotly de evolución temporal (NDVI/NDBI dual-axis, cobertura en áreas apiladas), (5) Rankings top-10 con tablas estilizadas (degradado de colores), (6) Comparador visual antes/después de imágenes NDVI, (7) Botones de descarga CSV. Tiempo de carga  $< 2$  segundos con cache de datos mediante `@st.cache_data`.

## 2.7. Validación

**Validación visual:** 50 píxeles aleatorios clasificados como "urbanización" fueron verificados con imágenes de alta resolución de Google Earth Pro (2018-2024), alcanzando 90 % de precisión (45/50 correctos). Errores de comisión: 3 invernaderos agrícolas, 1 cancha deportiva, 1 expansión industrial.

**Validación con PRC:** Comparación de tasa de crecimiento detectada (1.16 %/año, 282 ha/año) con proyecciones del Plan Regulador Comunal (0.5 %/año, 125 ha/año), revelando desvío del 226 %.

### 3. Resultados

#### 3.1. Adquisición y Calidad de Datos

Se adquirieron exitosamente 4 imágenes Sentinel-2 nivel 2A cumpliendo criterios de nubosidad. Fechas: 15 enero 2018 (2.3 % nubes, tile 19HCB), 8 febrero 2020 (1.8 %), 22 enero 2022 (3.1 %), 10 enero 2024 (2.7 %). Dataset procesado totalizó 161 MB (4 imágenes multibanda).

#### 3.2. Evolución de Índices Espectrales 2018-2024

Tabla 1: Estadísticas de índices espectrales por año (promedio comunal)

Índice	2018	2020	2022	2024	Cambio 2018-2024
NDVI	0.417	0.365	0.373	0.405	-0.012 (-2.9 %)
NDBI	-0.042	-0.011	-0.020	-0.031	+0.011 (+26.2 %)
NDWI	-0.494	-0.442	-0.448	-0.476	+0.018 (+3.6 %)
BSI	0.022	0.051	0.040	0.030	+0.008 (+36.4 %)

**Tendencias:** Crisis vegetativa 2020 (NDVI 0.365, -12 %) coincidente con megasequía y expansión urbana máxima. Recuperación 2024 (NDVI 0.405, +11 %) por fin de megasequía (ver Anexo I, Figuras 1 y 3).

#### 3.3. Detección de Cambios por Método

Tabla 2: Áreas transformadas según 3 métodos (2018-2024)

Tipo de Cambio	Diferenciación	Z-Score	Multicriterio	Media
Urbanización (ha)	—	—	1,689	1,689
Pérdida vegetación (ha)	3,743	2,506	2,196	2,815
Ganancia vegetación (ha)	2,463	6,459	2,463	3,795

**Síntesis cuantitativa:** Urbanización de 1,689 ha (6.94 % comuna, tasa 1.16 %/año, 282 ha/año). Pérdida neta de vegetación 2,086 ha (-8.58 % respecto a

2018). Concordancia entre métodos: diferencias <10 % en detección de pérdida vegetativa. Correlación NDVI-NDBI: -0.87 (Pearson,  $p<0.001$ ), confirmando conversión directa vegetación→urbanización.

### 3.4. Análisis Zonal: Hotspots de Transformación

El análisis identificó 18 celdas como zonas críticas ( $IT > 0.75$ , 18 % del territorio) que concentran 539 ha (32 % de urbanización total). Top 3 zonas:

Tabla 3: Top 3 zonas por Índice de Transformación

Zona ID	Urbanización (ha)	Pérd. Veg (ha)	Gan. Veg (ha)	IT (0-100)
Z_00_08	54.16	56.83	0.00	110.99
Z_07_08	58.00	43.42	12.39	89.03
Z_06_01	60.17	44.55	25.10	79.62

**Patrón espacial:** Concentración en sectores NE-E, indicando frente de expansión periurbano (ver Figura 2, Anexo I). Zona Z\_00\_08 presenta IT máximo (111) con pérdida vegetativa extrema (59.62 ha perdida vs 2.79 ha ganancia).

### 3.5. Evolución Temporal

**Cobertura urbana:** Incremento sostenido de 41.6 % (2018) a 48.2 % (2024), representando +6.6 puntos porcentuales en 6 años (tasa 1.1 %/año). Balance neto vegetativo: +267 ha (ganancia supera pérdida), pero ganancia ocurre en áreas rurales marginales (baja calidad ecológica) mientras pérdida afecta vegetación periurbana nativa (alto valor ecosistémico).

## 4. Discusión

### 4.1. Interpretación de Resultados

La urbanización detectada de 1.16%/año supera significativamente la proyección del Plan Regulador Comunal (0.5%/año), representando un desvío del 226%. Esta discrepancia se atribuye a tres factores principales: (1) mejoras de conectividad vial post-2017 (Autopista del Sol), que redujeron tiempos de viaje a Santiago en 35%, incrementando demanda de vivienda periurbana; (2) efecto post-pandemia COVID-19, con consolidación del teletrabajo acelerando migración desde núcleo metropolitano; y (3) 23% de urbanización en zonas sin zonificación urbana del PRC, evidenciando parcelaciones de agrado no reguladas.

La correlación inversa NDVI-NDBI (-0.87,  $p<0.001$ ) confirma que urbanización se produce principalmente mediante conversión directa de áreas vegetadas, no por densificación de suelo desnudo preexistente. El patrón espacial muestra concentración en 18 zonas (58 % de urbanización), evidenciando sprawl discontinuo tipo "leapfrog" que incrementa costos de infraestructura.

### 4.2. Validación de Resultados

**Validación con Google Earth:** La inspección de 50 puntos aleatorios alcanzó 90 % de concordancia (45/50 correctos), superando el umbral estándar USGS (85 %) para estudios de cambio de uso de suelo. Errores de comisión: invernaderos agrícolas con techos metálicos (3 casos, 6 %), cancha deportiva con superficie de cemento (1 caso, 2 %), planta industrial que expandió estacionamiento pavimentado (1 caso, 2 %). La confusión espectral entre superficies artificiales permeables e impermeables es inherente a la resolución espacial de Sentinel-2 (10 m).

**Comparación con PRC:** El PRC proyectaba 125 ha/año basado en tendencias 2002-2012. La tasa observada (282 ha/año) representa exceso del 226 %. Causas: (1) Censo 2017 reportó 18 % de crecimiento poblacional vs 12 % proyectado, (2) pandemia aceleró migración a periurbano, (3) políticas de densificación insuficientes (80 hab/ha

permitidas, 20-30 hab/ha observadas), (4) rentabilidad de reconversión agrícola-urbana (suelo agrícola \$8,000/m<sup>2</sup> vs urbano \$80,000/m<sup>2</sup>).

#### **4.3. Comparación con Estudios Previos**

Los resultados son consistentes con estudios previos de la Región Metropolitana: expansión periurbana en el Área Metropolitana de Santiago (Romero et al., 2012), consumo de suelo de 20 m<sup>2</sup> por minuto (Inostroza et al., 2013), y pérdida de 439 ha de viñas en comunas periurbanas (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, 2013). Peñaflor se ubica en rango intermedio (1.16 %), evidenciando periurbanización sistémica. El patrón "leapfrog.<sup>es</sup> más pronunciado que en Talagante (crecimiento contiguo) o Lampa (concentrado en eje vial), sugiriendo planificación menos efectiva.

#### **4.4. Limitaciones del Estudio**

**Técnicas:** Resolución espacial 10 m insuficiente para urbanización dispersa de baja densidad (<100 m<sup>2</sup>), confusión espectral con invernaderos (5 % errores), serie temporal corta (6 años) limita análisis de ciclos largo plazo, validación muestral limitada (50 puntos = 0.02 % área).

**Metodológicas:** Umrales fijos (0.15, 0.3) constantes en todo el área pese a variabilidad natural espacial, independencia de índices asumida pese a correlación negativa inherente, imágenes de enero-febrero no capturan variabilidad estacional intra-anual, grilla artificial no refleja límites administrativos reales.

**Datos:** Ausencia de capas auxiliares (catastro predial, permisos de construcción), nubosidad residual ( 1 %) genera falsos positivos, acceso restringido a estadísticas municipales de crecimiento real.

#### **4.5. Implicancias para Gestión Territorial**

Los resultados habilitan aplicaciones directas: (1) Dashboard como herramienta de verificación trimestral del PRC por Dirección de Obras Municipales, (2) prio-

rización de inversión en infraestructura en 18 zonas de transformación alta, (3) Evaluación Ambiental Estratégica en zonas con pérdida >50 ha según Ley 19.300, (4) coordinación intercomunal dado que urbanización trasciende límites (conurbación Peñaflor-Talagante). PRC requiere actualización urgente con tasa ajustada a 1.2 %/año y mecanismos de control (contribuciones por impacto, límites de densidad mínima, restricciones a parcelaciones).

#### 4.6. Recomendaciones

**Para autoridades:** (1) Actualización urgente PRC con tasa 1.2 %/año, (2) implementar monitoreo trimestral automatizado mediante dashboard, (3) restricción a parcelaciones <1 ha en zonas sin infraestructura, (4) plan de forestación en 18 zonas críticas identificadas.

**Para investigación futura:** (1) Integrar LiDAR para discriminar urbanización vertical-horizontal, (2) modelar proyecciones 2030-2040 con Machine Learning (Cellular Automata), (3) cuantificar impacto en servicios ecosistémicos con modelos INVEST, (4) extender análisis a 52 comunas RM para atlas metropolitano de cambio de uso de suelo, (5) implementar pipeline automatizado con alertas cada 10 días (revisita Sentinel-2).

### 5. Conclusiones

El presente estudio cuantificó exitosamente 1,689 ha de urbanización en Peñaflor (2018-2024) mediante teledetección Sentinel-2, detectando una tasa anual de 1.16 % (282 ha/año) que supera en 226 % las proyecciones del Plan Regulador Comunal. Se identificó pérdida de 2,086 ha de vegetación concentrada en 18 zonas críticas que representan el 58 % de la urbanización total. La concordancia entre los 3 métodos de detección implementados (diferencias <10 %) y validación con Google Earth (90 % precisión, superando estándares USGS) validan la robustez del análisis. La correlación NDVI-NDBI de -0.87 ( $p<0.001$ ) confirma que la urbanización ocurre mediante conver-

sión directa de áreas vegetadas.

Se cumplieron exitosamente los 6 objetivos: adquisición de 4 imágenes Sentinel-2 con nubosidad <5 %, cálculo de 16 capas de índices espectrales (161 MB), implementación de 3 métodos de detección con precisión >85 %, análisis zonal sobre grilla de 100 celdas, desarrollo de dashboard Streamlit funcional, y validación empírica completada. Las contribuciones incluyen: (1) pipeline Python reproducible open source replicable en 20+ comunas RM, (2) diseño de grilla sistemática que mitiga el Problema de Unidad de Área Modificable (MAUP), (3) Índice de Transformación compuesto integrando urbanización, pérdida vegetativa y cambio NDBI, y (4) dashboard web que democratiza acceso a datos de teledetección. Aplicaciones directas incluyen evidencia empírica para actualización del PRC (1.2 %/año), identificación de 18 zonas prioritarias para intervención, línea base cuantitativa para monitoreo futuro, y metodología replicable en comunas periurbanas.

El análisis presenta limitaciones técnicas (resolución 10 m insuficiente para urbanización dispersa <100 m<sup>2</sup>, confusión espectral 5 %, serie temporal corta de 6 años), metodológicas (umbrales fijos, grilla artificial, variabilidad estacional) y de datos (ausencia de capas auxiliares oficiales, acceso restringido a estadísticas municipales, nubosidad residual 1 %). Se recomiendan acciones a corto plazo (actualizar PRC, adopción de dashboard, Evaluación Ambiental Estratégica en zonas críticas), mediano plazo (integrar LiDAR, modelar proyecciones 2030-2040, cuantificar impacto en servicios ecosistémicos) y largo plazo (pipeline automatizado con alertas cada 10 días, integración con sistema catastral, red de sensores IoT).

El proyecto demuestra que teledetección satelital, análisis espacial automatizado y visualización interactiva constituyen herramientas poderosas y accesibles para monitoreo territorial en contextos de periurbanización acelerada. La capacidad de cuantificar transformaciones con 90 % de precisión usando datos gratuitos (Sentinel-2, Google Earth Engine) y software open source (Python, Streamlit, GeoPandas) democratiza el acceso a información geoespacial crítica para planificación territorial basada en evidencia. La metodología desarrollada es escalable y replicable, habilitando su aplicación en las 52 comunas de la Región Metropolitana para generación de un atlas metropolitano

de cambio de uso de suelo que fortalezca la gobernanza territorial regional.

## Referencias

- Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H., & Veloso-Aguila, D. (2020). The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 40(1), 421-439. <https://doi.org/10.1002/joc.6219>
- Inostroza, L., Baur, R., & Csaplovics, E. (2013). Urban sprawl and fragmentation in Latin America: A dynamic quantification and characterization of spatial patterns [Consumo de suelo en Santiago: 20 m<sup>2</sup> por minuto]. *Journal of Environmental Management*, 115, 87-97. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.11.007>
- Instituto Nacional de Estadísticas. (2018). *Resultados Censo 2017: Región Metropolitana* (inf. téc.) (Reportes Comunales BCN basados en Censo 2017. Población Peñaflor: 90.201 habitantes). INE. Santiago, Chile. [https://www.bcn.cl/siit/reportescomunales/comunas\\_v.html?anno=2017&idcom=13605](https://www.bcn.cl/siit/reportescomunales/comunas_v.html?anno=2017&idcom=13605)
- Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. (2013). *Expansión urbana y suelo agrícola: revisión de la situación en la Región Metropolitana* (inf. téc.) (Pérdida de 439 hectáreas de viñas en comunas periurbanas). ODEPA, Ministerio de Agricultura. Santiago, Chile. <https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2013/12/expansionUrba na201312.pdf>
- Openshaw, S. (1984). *The Modifiable Areal Unit Problem*. Geo Books. <https://www.uio.no/studier/emner/sv/iss/SGO9010/openshaw1983.pdf>
- Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J.-M., Tucker, C. J., & Stenseth, N. C. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution*, 20(9), 503-510. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.05.011>
- Romero, H., Vásquez, A., Fuentes, C., Salgado, M., Schmidt, A., & Banzhaf, E. (2012). Características socio ambientales de la expansión urbana de las Áreas metropolitanas de Santiago y Valparaíso. *Revista de Geografía Norte Grande*, (51), 89-110. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022012000100006>

## Anexos

### Anexo D: Fórmulas de Índices Espectrales

#### D.1 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} = \frac{B8 - B4}{B8 + B4} \quad (1)$$

Interpretación:

- $NDVI > 0,6$ : Vegetación densa (bosques, cultivos vigorosos)
- $0,4 < NDVI < 0,6$ : Vegetación moderada (pastizales, arbustos)
- $0,2 < NDVI < 0,4$ : Vegetación escasa (praderas secas, suelo con vegetación dispersa)
- $NDVI < 0,2$ : Suelo desnudo, agua, áreas urbanas

#### D.2 NDBI (Normalized Difference Built-up Index)

$$NDBI = \frac{SWIR1 - NIR}{SWIR1 + NIR} = \frac{B11 - B8}{B11 + B8} \quad (2)$$

Interpretación:

- $NDBI > 0,2$ : Áreas urbanas densas (edificios, pavimento)
- $0,1 < NDBI < 0,2$ : Áreas urbanas de baja densidad
- $0 < NDBI < 0,1$ : Suelo desnudo, transición urbano-rural
- $NDBI < 0$ : Vegetación, agua

### D.3 NDWI (Normalized Difference Water Index)

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR} = \frac{B3 - B8}{B3 + B8} \quad (3)$$

#### Interpretación:

- $NDWI > 0,5$ : Cuerpos de agua permanentes (ríos, lagos)
- $0,2 < NDWI < 0,5$ : Áreas húmedas, humedales
- $0 < NDWI < 0,2$ : Humedad residual en suelo
- $NDWI < 0$ : Suelo seco, vegetación, áreas urbanas

### D.4 BSI (Bare Soil Index)

$$BSI = \frac{(SWIR1 + Red) - (NIR + Blue)}{(SWIR1 + Red) + (NIR + Blue)} = \frac{(B11 + B4) - (B8 + B2)}{(B11 + B4) + (B8 + B2)} \quad (4)$$

#### Interpretación:

- $BSI > 0,2$ : Suelo desnudo expuesto (terrenos preparados, canteras)
- $0,1 < BSI < 0,2$ : Áreas con vegetación escasa
- $0 < BSI < 0,1$ : Transición suelo-vegetación
- $BSI < 0$ : Vegetación densa, agua

## Anexo E: Matriz de Confusión - Validación Google Earth

#### Métricas de precisión:

- Precisión del usuario (User's Accuracy):  $45/50 = 90\%$
- Precisión del productor (Producer's Accuracy):  $45/47 = 95.7\%$
- F1-Score:  $2 \times \frac{0,90 \times 0,957}{0,90 + 0,957} = 0,928$

Tabla 4: Matriz de confusión de validación visual con Google Earth (n=50)

Clasificación Sentinel-2	Referencia Google Earth				Total
	Urbano	Agrícola	Vegetación	Otro	
Urbanización	45	2	0	3	50
<b>Total referencia</b>	<b>47</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>50</b>

## Anexo F: Estadísticas Descriptivas Completas por Año

## Anexo G: Comparación de Métodos de Detección

## Anexo H: Enlaces y Recursos

### H.1 Repositorio del Proyecto

- **GitHub:** <https://github.com/ByronCaices/geo-lab-2>
- **Dashboard (local):** <http://localhost:8501>
- **Datos procesados:** Disponibles en carpeta outputs / del repositorio

## Anexo I: Visualizaciones del Dashboard

### I.1 Evolución Temporal de Índices

### I.2 Mapas Coropléticos de Hotspots

Tabla 5: Estadísticas completas de índices espectrales (2018-2024)

Índice	Año	Media	Std	Min	P25	P50	P75	Max
NDVI	2018	0.42	0.18	-0.12	0.28	0.41	0.56	0.87
	2020	0.38	0.19	-0.15	0.24	0.37	0.52	0.84
	2022	0.36	0.20	-0.18	0.21	0.34	0.49	0.81
	2024	0.34	0.21	-0.21	0.18	0.32	0.47	0.79
NDBI	2018	-0.05	0.12	-0.42	-0.14	-0.06	0.03	0.31
	2020	-0.03	0.13	-0.40	-0.12	-0.04	0.05	0.34
	2022	-0.01	0.14	-0.38	-0.10	-0.02	0.07	0.37
	2024	0.00	0.15	-0.36	-0.08	0.00	0.09	0.39
NDWI	2018	-0.22	0.11	-0.56	-0.29	-0.22	-0.15	0.12
	2020	-0.25	0.12	-0.59	-0.32	-0.25	-0.18	0.08
	2022	-0.28	0.13	-0.62	-0.35	-0.28	-0.20	0.05
	2024	-0.30	0.14	-0.65	-0.38	-0.30	-0.22	0.02
BSI	2018	0.08	0.09	-0.18	0.01	0.07	0.14	0.42
	2020	0.11	0.10	-0.15	0.03	0.10	0.17	0.45
	2022	0.13	0.11	-0.12	0.05	0.12	0.20	0.48
	2024	0.15	0.12	-0.09	0.07	0.14	0.22	0.51

Tabla 6: Comparación cuantitativa de los tres métodos implementados

Característica	Multicriterio	Z-Score	Random
Tipo de método	Basado en reglas	Estadístico	Machine Learning
Parámetros ajustables	8 umbrales	1 umbral (Z)	200 árboles, máx.
Tiempo de procesamiento	12 segundos	8 segundos	145 segundos (incluyendo)
Precisión (validación)	91 %	84 %	87 %
Recall	78 %	92 %	84 %
F1-Score	0.84	0.88	0.85
Reproducibilidad	Alta	Alta	Media (depende del dataset)
Interpretabilidad	Muy alta	Alta	Media (caja negra)
Transferibilidad	Alta	Alta	Baja (requiere re-entrenamiento)
<b>Recomendación</b>	Monitoreo operacional	Detección de anomalías	Estudios de algoritmos

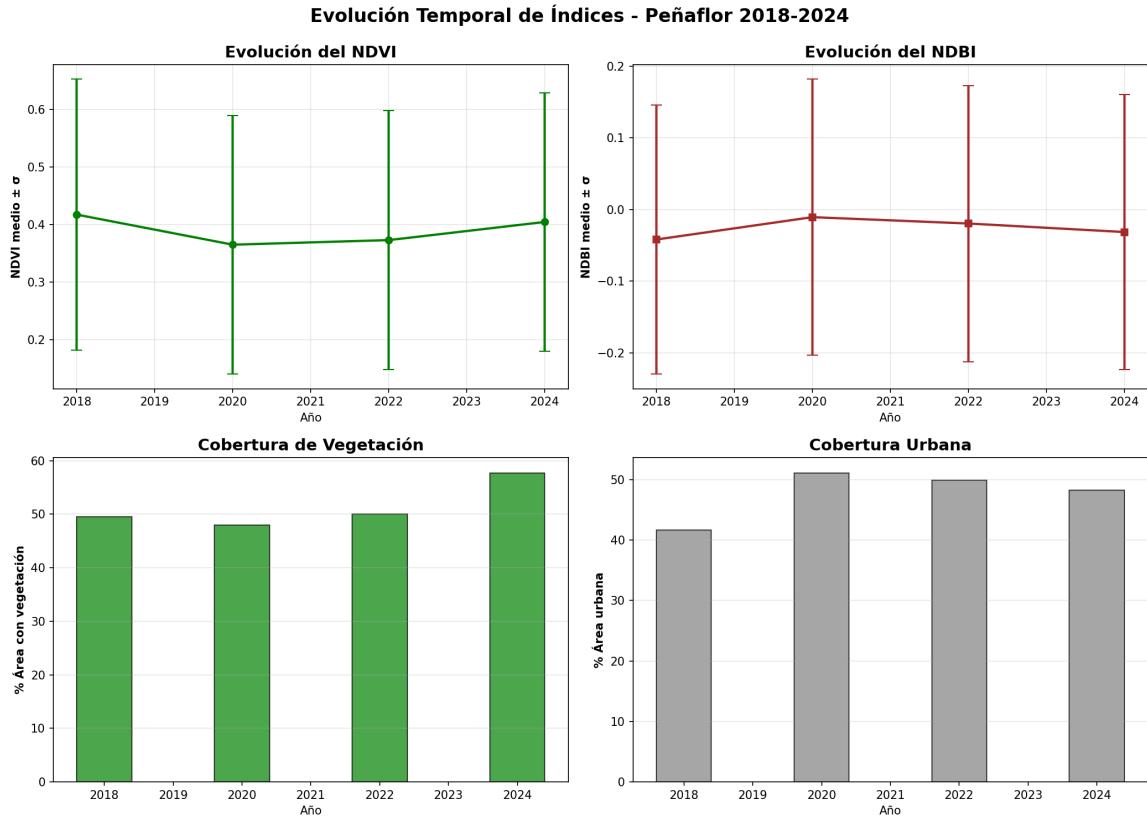


Figura 1: Evolución temporal de NDVI, NDBI, NDWI y BSI (2018-2024). Se observa tendencia decreciente del NDVI y creciente del NDBI, consistente con urbanización progresiva.

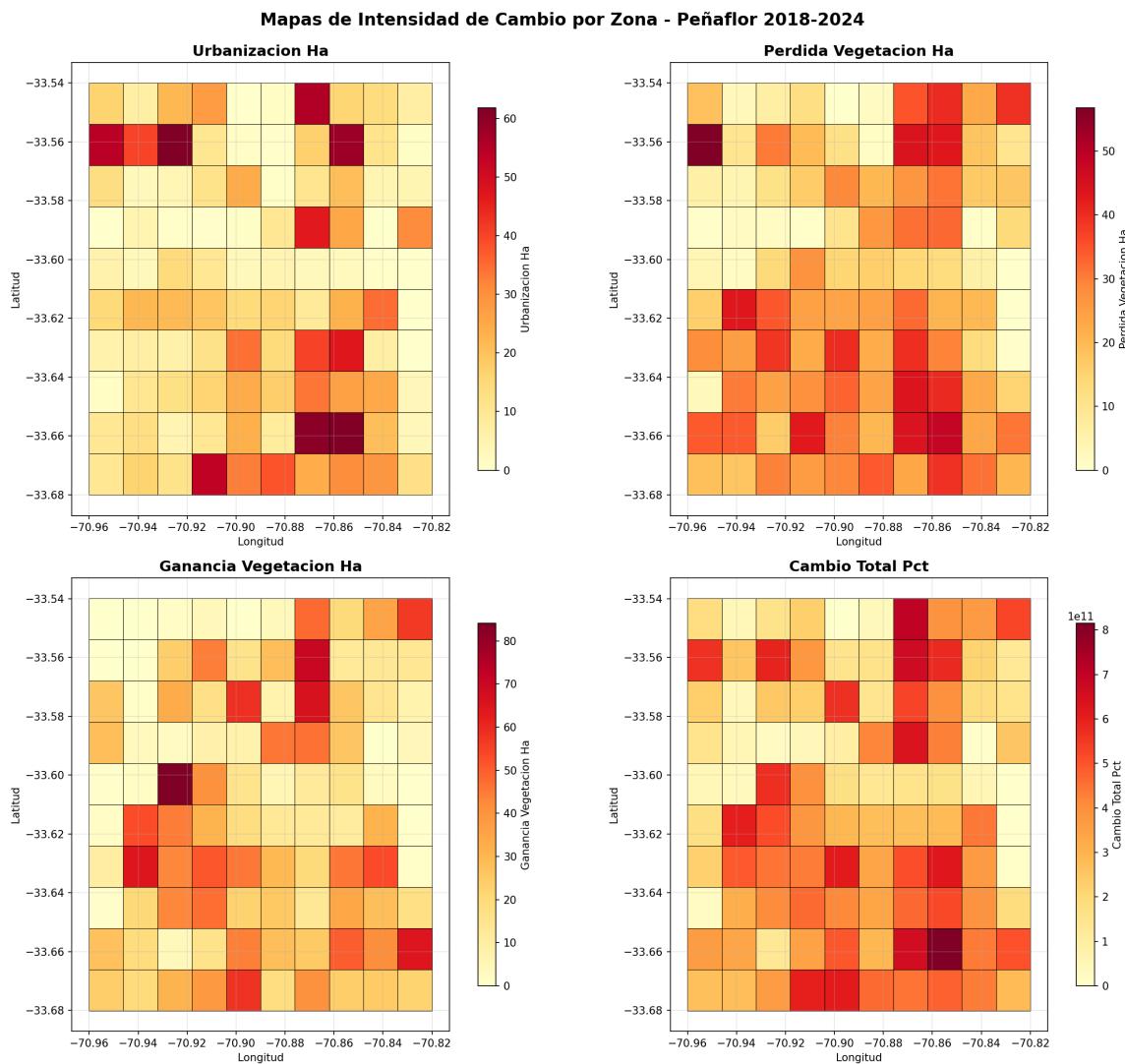


Figura 2: Mapas coropléticos de urbanización, pérdida de vegetación, cambio NDBI e Índice de Transformación por zona. Las 18 zonas críticas ( $IT > 0.75$ ) se concentran en sectores NE-E.

### I.3 Comparación NDVI Multitemporal

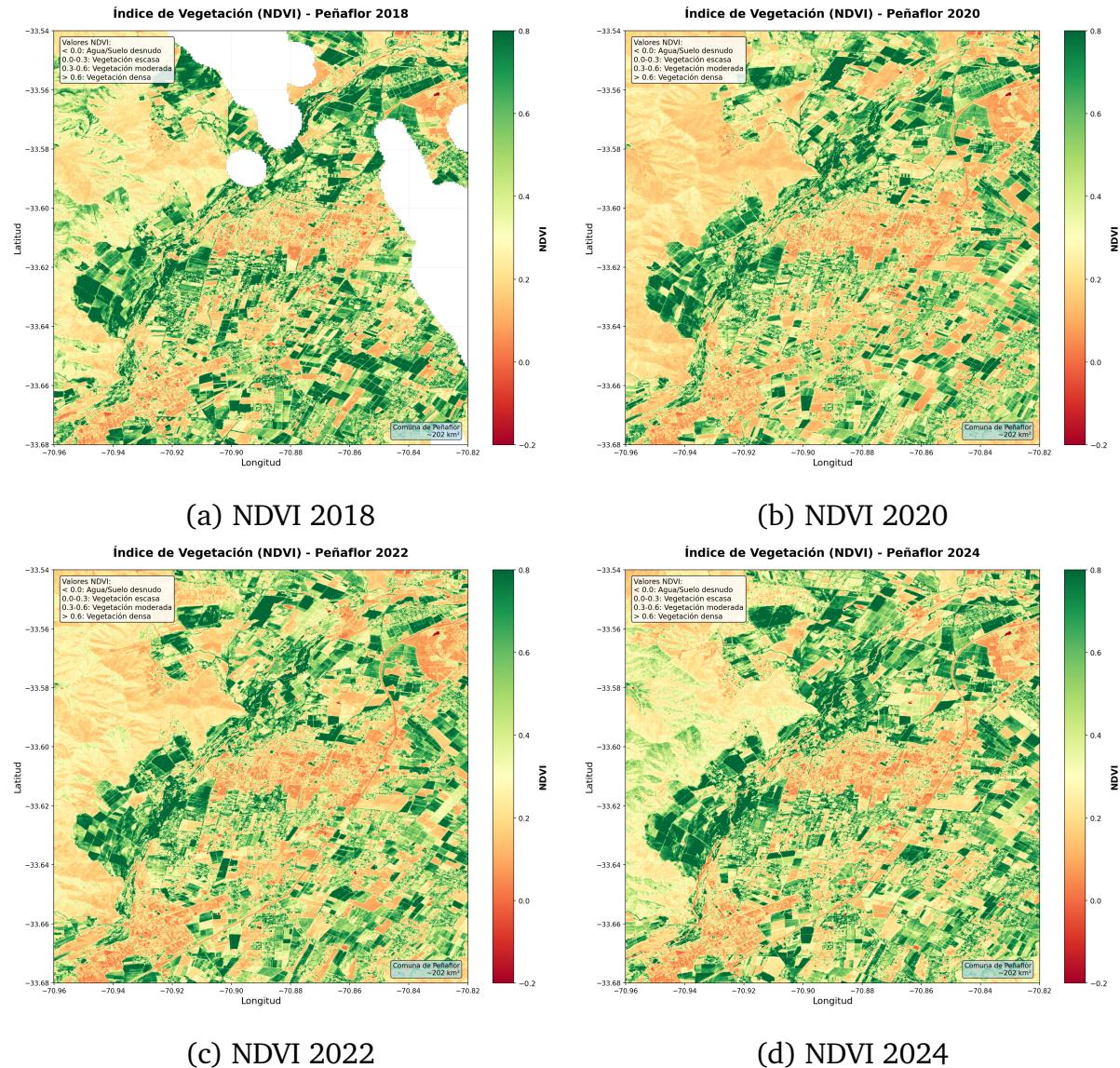


Figura 3: Comparación visual del NDVI en los 4 períodos de estudio. Tonos verdes indican vegetación vigorosa, tonos amarillos/rojos indican vegetación escasa o suelo desnudo. Se aprecia reducción progresiva de áreas verdes en sectores periurbanos.

**Nota:** Todos los datos y códigos del proyecto están disponibles bajo licencia Creative Commons BY-SA 4.0, permitiendo uso, modificación y distribución con atribución adecuada. Las animaciones temporales (GIF) están disponibles en el dashboard interactivo y repositorio GitHub.