

Simulación del cambio de uso de suelo en el área periurbana Villarrica-Pucón, Chile, 1998-2065: escenarios con y sin futuros proyectos viales*

Cristián Henríquez^o Mauricio Moralesⁿ Paulina Contreras^l Camila Aguayo^æ Vicente Aprigliano[#] Jorge Qüense[€] 

Resumen

La pandemia de Covid-19 intensificó la migración urbana hacia zonas turísticas, generando presiones de periurbanización no planificada. Este estudio analiza los cambios de uso de suelo en el área periurbana de Villarrica-Pucón (Chile) bajo dos escenarios al 2065: tendencial y con nuevos proyectos viales, utilizando el modelo Dyna-CLUE y datos satelitales (1998-2018). Los resultados muestran un crecimiento explosivo de parcelas de agrado (3.208 ha en 2018 a 12.000 ha en 2065), ocupando 8 veces la superficie urbana actual, pero con mínima influencia de las vías proyectadas en su localización. Esto revela que la proximidad a amenidades naturales (lago, volcán) predomina sobre la accesibilidad vial como factor de expansión. Se concluye que: (i) los instrumentos de planificación chilenos son insuficientes para regular la periurbanización turística, (ii) las infraestructuras de transporte no son el principal impulsor de cambios de uso de suelo en contextos lacustres, y (iii) se requieren modelos de gestión territorial que integren variables paisajísticas y riesgos naturales. El estudio aporta evidencia para reorientar políticas en áreas bajo presión turística-pospandemia.

Palabras clave: Dyna-CLUE, infraestructura vial, parcelas residenciales rurales, peri-urbanización, planificación, simulación, uso del suelo.

Ideas destacadas: artículo de investigación que analiza como la pandemia aceleró la migración a zonas turísticas como Villarrica-Pucón (Chile). Usando el modelo Dyna-CLUE, proyectamos que las parcelas de agrado crecerán 275 % para 2065, superando 8 veces el área urbana actual. Sorprendentemente, las nuevas vías tienen mínima influencia en esta expansión, revelando que la cercanía al lago y volcán son los factores clave.



RECIBIDO: 28 DE MARZO DE 2022. | EVALUADO: 14 DE DICIEMBRE 2022. | ACEPTADO: 22 DE AGOSTO DE 2024.

CÓMO CITAR ESTE ARTÍCULO

Henríquez, Cristian; Morales, Mauricio; Contreras, Paulina; Aguayo, Camila; Aprigliano, Vicente; Qüense, Jorge. 2025. "Simulación del cambio de uso de suelo en el área periurbana Villarrica-Pucón, Chile, 1998-2065: Escenarios con y sin futuros proyectos viales". *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía* 34 (2): 496-517. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v34n2.101849>.

* La presente investigación ha sido financiada por el Proyecto ANID/FONDECYT Regular N° 1220688 "¿Qué nos depara el Antropoceno Urbano?: aportes de los modelos espaciales predictivos al sistema urbano chileno" y por el Proyecto ANID/FONDECYT Regular N° 1180268. Además, ha recibido el apoyo del Centro CEDEUS, ANID/FONDAP 1523A0004.

^o Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago – Chile. ✉ cghenriq@uc.cl – ORCID: 0000-0001-6845-1973.

ⁿ Universidad de Zaragoza, Zaragoza – España. ✉ mtmorale@uc.cl – ORCID: 0000-0002-5787-0942.

^l Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago – Chile. ✉ plcontreras@uc.cl – ORCID: 0000-0003-3775-5119.

^æ Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago – Chile. ✉ camilaaguayovillablanca@gmail.com – ORCID: 0009-0004-9448-3265.

[#] Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso – Chile. ✉ vicente.aprigliano@pucv.cl – ORCID: 0000-0002-7285-2742.

[€] Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago – Chile. ✉ jquense@uc.cl – ORCID: 0000-0002-0692-9414.

✉ Correspondencia: Cristian Henríquez, Instituto de Geografía, Campus San Joaquín, Pontificia Universidad Católica de Chile, Av. Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago, Chile.

Simulation of Land Use Change in The Peri-Urban Villarrica-Pucón Area, Chile, 1998-2065: Scenarios With And Without Future Road Projects

Abstract

The Covid-19 pandemic intensified urban migration to tourist areas, generating unplanned peri-urbanization pressures. This study analyzes land use changes in the peri-urban area of Villarrica-Pucón (Chile) under two scenarios to 2065: trend and new road projects, using the Dyna-CLUE model and satellite data (1998-2018). The results show an explosive growth of agricultural plots (3,208 ha in 2018 to 12,000 ha in 2065), occupying 8 times the current urban area, but with minimal influence of the projected roads on their location. This reveals that proximity to natural amenities (lake, volcano) predominates over road accessibility as an expansion factor. It is concluded that: (i) Chilean planning instruments are insufficient to regulate tourist peri-urbanization, (ii) transportation infrastructure is not the main driver of land use changes in lake contexts, and (iii) territorial management models that integrate landscape variables and natural risks are required. The study provides evidence for reorienting policies in areas under tourism-post pandemic pressure.

Keywords: Dyna-CLUE, road infrastructure, rural residential parcels, peri-urbanization, planning, simulation, land use.

Highlights: research article that analyzes how the pandemic accelerated migration to tourist areas such as Villarrica-Pucón (Chile). Using the Dyna-CLUE model, we project that the parcels de agrado will grow 275 % by 2065, surpassing 8 times the current urban area. Surprisingly, new roads have minimal influence on this expansion, revealing that proximity to the lake and volcano are the key factors.

Simulação da mudança no uso da terra na área periurbana de Villarrica-Pucón, Chile, 1998-2065: cenários com e sem projetos rodoviários futuros

Resumo

A pandemia da Covid-19 intensificou a migração urbana para áreas turísticas, gerando pressões de periurbanização não planejadas. Este estudo analisa as mudanças no uso da terra na área periurbana de Villarrica-Pucón (Chile) em dois cenários até 2065: tendência e novos projetos rodoviários, usando o modelo Dyna-CLUE e dados de satélite (1998-2018). Os resultados mostram um crescimento explosivo de lotes de terra (3.208 ha em 2018 para 12.000 ha em 2065), ocupando 8 vezes a área urbana atual, mas com influência mínima das estradas projetadas em sua localização. Isso revela que a proximidade com amenidades naturais (lago, vulcão) predomina sobre a acessibilidade rodoviária como fator de expansão. Conclui-se que: (i) os instrumentos de planejamento chilenos são insuficientes para regular a periurbanização turística; (ii) a infraestrutura de transporte não é o principal fator de mudança no uso da terra em contextos de lagos; e (iii) são necessários modelos de gestão da terra que integrem variáveis de paisagem e riscos naturais. O estudo fornece evidências para a reorientação de políticas em áreas sob pressão de turismo-post pandemia.

Palavras-chave: Dyna-CLUE, infraestrutura rodoviária, lotes residenciais rurais, periurbanização, planejamento, uso da terra.

Ideias destacadas: artigo de pesquisa que analisa como a pandemia acelerou a migração para áreas turísticas como Villarrica-Pucón (Chile). Usando o modelo Dyna-CLUE, projetamos que os lotes de terra crescerão 275 % até 2065, ultrapassando 8 vezes a área urbana atual. Surpreendentemente, as novas estradas têm influência mínima sobre essa expansão, revelando que a proximidade com o lago e o vulcão são os principais fatores.

Introducción

El crecimiento urbano acelerado es un fenómeno global, particularmente crítico en América Latina —la región más urbanizada del mundo (81 %) (United Nations 2019)—, donde la pandemia de Covid-19 ha intensificado patrones de migración desde grandes metrópolis a ciudades medias, pequeñas y áreas periurbanas con amenidades naturales. Esta tendencia, sumada al crecimiento turístico preexistente plantea escenarios inciertos respecto al futuro próximo en los cambios de uso del suelo. En este sentido, la aproximación de los modelos prospectivos de cambio de uso de suelo juega un rol relevante en la comprensión de estas dinámicas y la mejor toma de decisiones.

Uno de los principales problemas de este acelerado crecimiento urbano es que no ha sido planificado o se realiza, en la mayor parte de los casos, de manera reactiva y burocrática. En muchos casos la lentitud en la aprobación de los Instrumentos de Planificación Territorial (IPT) impide anticiparse a las rápidas dinámicas inmobiliarias o la aparición de asentamientos espontáneos e irregulares, como es el caso de parcelas de agrado y condominios privados en el área periurbana de ciudades de aptitud turística. Esto genera un serio problema cuando la ciudad se expande fuera de los límites urbanos oficiales, tanto de manera fragmentada como desordenada, especialmente sobre zonas ambientalmente sensibles o en zonas de peligros naturales, aumentando el nivel del riesgo ante eventos naturales.

Varios autores (Trentin y de Freitas 2010; Henríquez 2014; National Research Council 2014) señalan que este crecimiento acelerado de las ciudades demanda nuevas metodologías de análisis que puedan contribuir a conducir mejor el proceso de planificación. Dentro de las nuevas metodologías que se vienen aplicando en geografía destaca la modelación del cambio de uso de suelo y su simulación futura. El interés científico por conocer, caracterizar, medir y simular las dinámicas de cambio de uso de suelo urbano, ofrece grandes beneficios a los tomadores de decisión especialmente en áreas en proceso de urbanización (Agarwal et ál. 2002). La integración de los sistemas de información geográfica (SIG), percepción remota y modelación ha permitido generar enormes avances en la generación de escenarios futuros y evaluación de impactos (Kamusoko 2017).

Dentro de los procesos explicativos del crecimiento urbano, existen diversos factores de atracción que van explicando la elección de ciertos lugares en lugar de

otros. Entre ellos se encuentra la aptitud topográfica, la centralidad, el valor del suelo, la cercanía a amenidades ambientales, la accesibilidad, entre otros. La inclusión de la infraestructura de transporte en el ámbito periurbano, tanto actual como futura, ha sido un aspecto poco explorado en los modelos de cambio de uso de suelo en casos latinoamericanos.

En este marco, el objetivo es simular escenarios de cambio de uso de suelo (2035-2065) en Villarrica-Pucón (Chile), evaluando el impacto de nuevas vías y fuerzas motrices no convencionales. La hipótesis principal es que los proyectos viales inducirán urbanización de baja densidad. La investigación integra SIG, percepción remota y modelación espacial para ofrecer insumos científicos que redireccionen políticas de planificación en contextos de alta presión turístico-ambiental.

La planificación integrada de transporte y uso del suelo

La planificación de sistemas de transporte urbano ha experimentado un cambio de paradigma, transitando desde enfoques tradicionales hacia modelos contemporáneos que priorizan la sostenibilidad, la accesibilidad y la equidad social (Banister 2008). Este giro exige una integración efectiva entre la planificación de los usos de suelo urbano y los sistemas de transporte, un desafío particularmente complejo en contextos de acelerada urbanización.

Si bien en las últimas décadas ha crecido significativamente la investigación sobre la interacción entre cambio de uso de suelo y transporte (Acheampong y Silva 2015; Kii et ál. 2016; Shahumyan y Moeckel 2016), persisten limitaciones importantes. Los enfoques existentes han sido específicos y carecen de universalidad, lo que dificulta su replicabilidad en distintos contextos (Wegener 2004; Kii et ál. 2016). De esa forma, es importante comprender que la relación entre cambio de uso de suelo y transporte es bidireccional. Como destacan Rodrigue, Comtois y Slack (2013), el diseño del sistema de transporte influye en los usos del suelo, y viceversa. Por un lado, las actividades económicas tienden a concentrarse en áreas de mayor accesibilidad; por otro, los sistemas de transporte se expanden en respuesta a las demandas de los sectores en crecimiento.

En América Latina, los procesos de formación urbana desde fines del siglo xv hasta principios del xvi estuvieron marcados por un sistema de transporte inducido por la urbanización (Vasconcellos 2014) y por una limitada

variedad de tecnologías de movilidad. No obstante, con la llegada de los ferrocarriles eléctricos a principios del siglo XX y de los automóviles hacia finales del mismo siglo, la expansión urbana y el cambio de uso de suelo pasaron a ser más influidos por los sistemas de transportes (Adams 1970; Jones 2014). Un ejemplo emblemático es Río de Janeiro, donde a fines del siglo XIX se instalaron extensas líneas de ferrocarril con la intención de trasladar las industrias hacia los suburbios y reorientar los usos de suelo en el centro hacia usos residenciales y de servicios (Abreu 2008). Este patrón se replicó en otras ciudades latinoamericanas. Sin embargo, persiste una brecha en la integración entre la planificación del transporte y del uso de suelo en el Sur Global, lo que genera impactos socioeconómicos y ambientales negativos, especialmente en ciudades medianas con alto potencial de expansión (Cervero 2013).

Los estudios recientes sobre modelos de transporte y uso de suelo en la región evidencian vacíos de investigación. Por ejemplo, Guzman (2018) adaptó un modelo europeo para Bogotá, Colombia, y destacó desafíos clave: falta de datos, omisión de indicadores de transporte no motorizado y poca consideración de las desigualdades espaciales (en infraestructura y condiciones socioeconómicas). Además, la complejidad estadística de estos

modelos puede distorsionar la realidad local. Guzman propone desarrollar modelos más sencillos y con perspectivas de largo plazo, donde los sistemas de información geográfica (SIG) resultan herramientas promisorias.

En conclusión, es necesario profundizar no solo en la interacción transporte-uso de suelo —como lo hicieron Guzman (2018) y Guerra et ál. (2018)—, sino también extender estas investigaciones a ciudades medianas. Estas áreas, con mayor potencial de expansión urbana, podrían planificarse hacia modelos más sostenibles, a diferencia de las metrópolis ya consolidadas.

Materiales y métodos

Área de estudio

El área de estudio corresponde a las comunas de Villarrica y Pucón, ubicadas en el sureste de la región de La Araucanía, Chile. Esta zona concentra 8,7 % de la población regional, que corresponde (84.001 habitantes), con 36.480 personas en el área urbana de Villarrica —cuya ciudad principal se sitúa al oeste del lago homónimo—, y 18.354 habitantes en Pucón, al este del mismo lago (Figura 1).

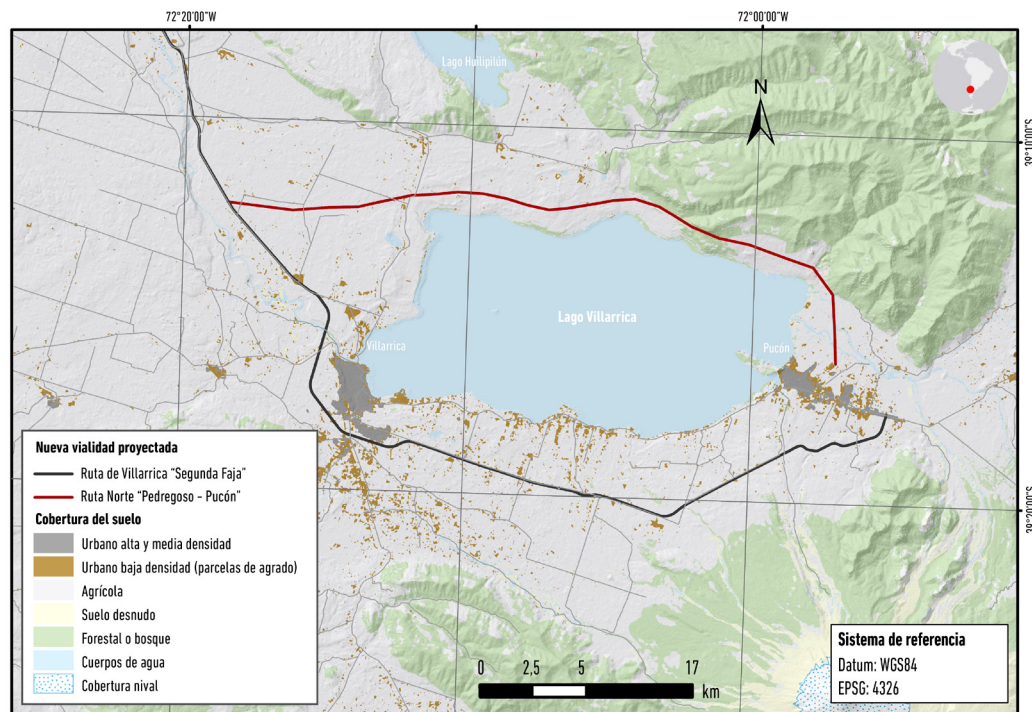


Figura 1. Villarrica-Pucón y su área periurbana (Chile), 2018.

Fuente: elaboración propia a partir de la clasificación supervisada de usos/coberturas de suelo imagen satelital Landsat-8 (2018).

El clima es templado cálido mesotermal (Cfb1pH), con temperaturas medias entre 22,8 °C en enero y 3 °C en julio, y una precipitación anual de 2.544 mm distribuida todo el año (Santibáñez 2017). La zona pertenece a la cuenca del río Toltén (7.886 km²), que recibe afluentes como los ríos Pedregoso y Allipén, e incluye ocho subcuencas, entre ellas las del río Pucón, lago Caburga y lago Villarrica. Este último, compartido por ambas comunas, tiene un origen glaciar, con 175,9 km² de superficie, 21 km³ de volumen y una profundidad máxima de 175 m (Municipalidad de Pucón 2016).

El área se ubica en una zona lacustre-cordillerana, dominada por el volcán Villarrica (2.820 m.s.n.m.), un estratovolcán con uno de los mayores registros eruptivos de Chile. Tanto el volcán como el lago representan la variedad hidrogeomorfológica de la zona, generando geoecosistemas clave para el turismo (Municipalidad de Pucón 2016).

Las amenazas presentes son consecuencia de las dinámicas naturales y las interacciones con la ocupación humana. Una de las principales amenazas son las erupciones volcánicas del volcán Villarrica. En el caso de Pucón, de acuerdo a la información del Servicio Nacional de Geología y Minería (Moreno y Clavero 2006) la comuna tiene sobre un 10 % de su territorio bajo algún peligro volcánico (Municipalidad de Pucón 2016). Asimismo, Villarrica también presenta áreas comunales expuestas al peligro volcánico, específicamente por lahares y lavas (Municipalidad de Villarrica 2011). Otros riesgos que afectan a ambas comunas son las inundaciones, anegamientos y remociones en masa.

Detección de cambio de uso y coberturas de suelo

Para analizar los cambios de uso de suelo entre 1998 y 2018, se realizó una clasificación supervisada de imágenes satelitales Landsat 5 TM (1998, 2008) y Landsat 8 OLI (2018), descargadas del repositorio del USGS (2018; Tabla 1). Las imágenes fueron sometidas a preprocesamiento (correcciones geométricas, radiométricas y atmosféricas) siguiendo metodologías estándar (Pu, Landry y Zhang 2015). La clasificación se basó en una adaptación de las Zonas Climáticas Locales (ZCL) de Stewart y Oke (2012), definiendo siete categorías:

- Urbano alta y media densidad: mezcla densa de edificios de altura alta y media. Escasa o nula vegetación arbórea. Suelo mayormente pavimentado. Materiales de construcción de piedra, ladrillo, teja y hormigón.
- Urbano baja densidad (parcelas de agrado): edificios pequeños o medianos en disposición dispersa en un entorno natural. Abundancia de cobertura vegetal permeable (plantas bajas, árboles dispersos).
- Suelo agrícola: dominado por cultivos herbáceos o pastizales. Mínima presencia de árboles. La función de la zona es agrícola.
- Bosque: árboles caducifolios o perennes en alta densidad. Suelo permeable con vegetación baja. La función de la zona es natural.
- Cuerpos de agua: cuerpos de agua grandes y abiertos, como lagos, o cuerpos pequeños como ríos, embalses y lagunas.
- Suelo desnudo: superficie sin vegetación (suelo expuesto o arenoso). Uso natural o agrícola.
- Cobertura nival: cobertura de nieve y glaciares.

Tabla 1. Imágenes satelitales utilizadas para la clasificación

Año	Satélite/sensor	Fecha adquisición	Filas-columnas	Resolución espacial (m)
1998	Landsat-5 - TM	14-02-1998	233/87	30
2008	Landsat-5 - TM	10-12-2008	233/87	30
2018	Landsat-8 - OLI	15-12-2018	233/87	30

Fuente: elaborado a partir de imágenes obtenidas desde USGS (1998, 2008, 2018).

Los procesos de pretratamiento de las imágenes satelitales se realizaron en el programa ENVI 5.3 (correcciones geométricas, radiométricas y atmosféricas), y para la

clasificación de ZCL se usó el módulo de clasificación supervisada de ZCL en el programa SAGA. Por último, para la reclasificación de las siete ZCL se usó el programa ArcGIS 10.8.

Simulación mediante modelos espacialmente explícitos

La simulación futura para la conurbación Villarrica-Pucón se realizó utilizando el modelo Dyna-CLUE (*Conversion of Land Use of its Effects at Small Regional Extent*) (Verburg y Veldkamp 2002). Este modelo permite proyectar cambios en el uso y cobertura del suelo mediante simulaciones espacialmente explícitas, considerando dos escenarios para los años 2035 y 2065: uno tendencial o *business as usual* (BAU) y otro con la influencia de la nueva vialidad proyectada para el área

periurbana, ambos para 2035 y 2065 considerando las trayectorias de usos y coberturas de suelo observadas entre 1998 y 2018.

El modelo considera la inclusión de las fuerzas motrices que más inciden en el crecimiento urbano, las principales restricciones del territorio y las demandas de usos de suelo futuro. Así mismo, este modelo considera la incorporación de reglas de conversión para cada tipo de uso de suelo y reglas de probabilidad de transición espacial (elasticidades) (Xia et ál. 2018). El esquema metodológico general se aprecia en la Figura 2.

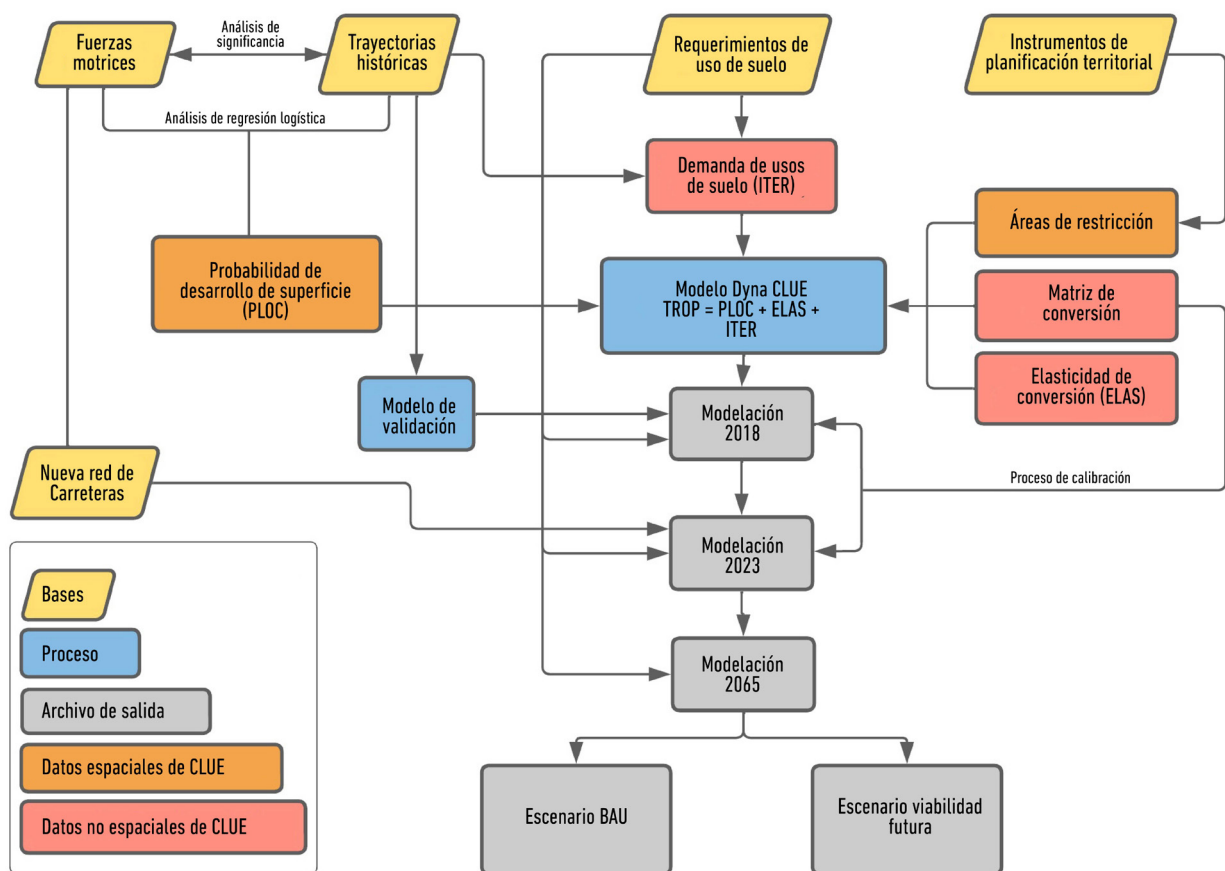


Figura 2. Esquema general del modelo de cambio de uso/cobertura de suelo propuesto. Fuente: elaboración propia a partir de Verburg, Veldkamp y Lesschen (2010).

La determinación de las demandas puede ser mediante análisis espaciales como no-espaciales, dependiendo de cada escenario propuesto. En el caso del escenario tendencial las demandas para cada uso/cobertura de suelo se basó en la fórmula de regresión lineal simple: $Y = \beta_0 + \beta_1 x + \epsilon$, donde, Y es la respuesta, β_0 y β_1 son los parámetros desconocidos de la intersección y la

pendiente, respectivamente, y ϵ corresponde al error estimado por el modelo (Walpole et ál. 2012).

Esta ecuación permitió proyectar las hectáreas para 2065 en función de la tendencia observada para 1998, 2008 y 2018, de los diferentes usos de suelo derivadas de la clasificación de imágenes Landsat.

En el caso del escenario con influencia de la nueva vialidad proyectada, se usó la misma fórmula, pero con base a la proyección de parcelas de agrado, para 2008 y 2018 según los datos no espaciales del Servicio

Agrícola y Ganadero de Chile (SAG) (Tabla 2). Este dato considera las hectáreas aprobadas para nuevas parcelaciones fuera del límite urbano de las ciudades de Villarrica y Pucón.

Tabla 2. Demanda de uso/cobertura de suelo para los diferentes escenarios en 2065

Año base/ escenarios	Superficie (ha)						
	Urbano	Parcelas de agrado	Agrícola	Suelo desnudo	Bosque	Agua	Cobertura nival
Uso observado 2018	978,8	3.154,9	86.885,3	5.807	62.166,3	19.885	13.163,8
Tendencial (BAU) 2065	1.010,2	3.331,3	89.700,3	5.601,7	5.9348,8	19.885	13.163,8
Nueva vialidad proyectada 2065	1.138,1	4.095,4	88.545,8	5.500,7	59.712,2	19.885	13.163,8

Nota: superficie obtenida a partir de la clasificación supervisada del uso/cobertura de suelo realizada para 2018 y superficie modelada para 2065 a partir de regresión lineal simple para escenario BAU y de proyección de parcelas de agrado (SAG) y vías futuras (MOP) para escenario con nueva vialidad proyectada.

Las fuerzas motrices corresponden a los factores o fuerzas claves que direccionan los usos/coberturas de suelo. Este análisis asocia la probabilidad de ocurrencia de un determinado uso/cobertura de suelo a las condiciones geográficas y demográficas del área de Villarrica-Pucón.

Se definieron diecisiete fuerzas motrices (Tabla 3) con base a una revisión bibliográfica de estudios de simulación de cambio de uso de suelo (Henríquez 2014; Puertas, Henríquez y Meza 2014; Henríquez et ál. 2021; Henríquez et ál. 2023).

Tabla 3. Fuerzas motrices utilizadas

N°	Variables	Unidad medida	Fuente
1	Vialidad estructurante	Distancia (m)	Ministerio de Obras Públicas (2020)
2	Distancia al lago Villarrica y lago Huilpilún	Distancia (m)	Dirección General de Aguas (2019)
3	Atractivos turísticos	Distancia (m)	SENATUR (2021)
4	Pendiente	Grados (°)	ASF DAAC (2014)
5	Agua potable rural (APR)	Distancia (m)	Ministerio de Obras Públicas (2017)
6	Establecimientos educacionales	Distancia (m)	Ministerio de Educación (2019)
7	Establecimientos de salud	Distancia (m)	Ministerio de Salud (2021)
8	Centro urbano principal (Villarrica y Pucón)	Distancia (m)	Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU 2020)
9	Centro urbano secundario (Ñancul y Huisapi)	Distancia (m)	
10	Densidad poblacional	Habitantes/hectáreas	INE (2017)
11	Tamaño predial	Hectáreas (ha)	CIREN (2013)
12	Ríos principales	Distancia (m)	Dirección General de Aguas (2021)
13	Canales	Distancia (m)	Comisión Nacional de Riego (2021)
14	Comunidades indígenas	Distancia (m)	CONADI (2021)
15	Avalúo fiscal	UF/ha*	Servicio de Impuestos Internos (2021)
16	Capacidad de uso del suelo	Clases-(I - VIII)	CIREN (2014)
17	Distancia al volcán Villarrica	Distancia (m)	SERNAGEOMIN (2021)

Nota: * valor de la Unidad de Fomento (UF) al 29 de junio 2023 corresponde a CLP 36.088 (pesos chilenos), es decir, USD 45 aproximadamente por hectárea.

Una vez normalizados los factores (Anexo 1) se procedió a utilizar un modelo de regresión logística para cada uso/cobertura de suelo (Schneider y Pontius 2001). Para ello, se utilizó el módulo *Land Change Modeler* (LCM) del programa IDRISI (versión Selva), considerando como entrada la información en formato *raster* (Dubovyk, Sliuzas y Flacke 2011; Shu et ál. 2014). Matemáticamente se calcula usando la siguiente fórmula:

$$\ln = \frac{P_i}{1-P_i} = \beta_0 + \beta_1 X_{1,i} + \beta_2 X_{2,i} + \dots + \beta_n X_{n,i}$$

Donde, P_i corresponde a la probabilidad que tiene cada píxel en poder cambiar de uso/cobertura de suelo (i), basado en el estado observado de cada fuerza motriz (X_n) y sus coeficientes modelados ($B_{1 \rightarrow n}$).

Antes del proceso de cálculo de la regresión logística para cada uso/cobertura de suelo, se procedió a la aplicación de una prueba estadística de asociación univariada (*Cramer's v*) para obtener la significancia estadística de las variables dependientes (usos y coberturas de suelo) y las variables independientes (fuerzas motrices). Adicionalmente, se utilizaron dos criterios: primero evidencias provenientes de estudios sobre cambio de usos y coberturas de suelo desarrollados previamente para ciudades medias chilenas (Henríquez et ál. 2021; 2023), y segundo corresponde al propio conocimiento experto sobre los potenciales determinantes de cambio de uso y cobertura de suelo en el área de estudio. Es importante mencionar que se hicieron dos correlaciones una para

2018 y otra para 2035 con los tramos nuevos de la futura infraestructura vial.

Para validar la exactitud de los modelos de regresión logística, se utilizaron la curva ROC (acrónimo de *Receiver Operating Characteristic* o Característica Operativa del Receptor) y pseudo-R². Estas pruebas estadísticas se usaron para interpretar el grado de independencia de las variables predictoras y el grado de ajuste del modelo, respectivamente (Clark y Hosking 1986; Shu et ál. 2014).

Para poder integrar toda la información se usó el modelo Dyna-CLUE y poder asignar los usos de suelo futuros, se aplicó la fórmula propuesta por Verburg y Veldkamp (2002) para calcular la probabilidad total ($TPROP_{i,u}$), que se expresa en la siguiente fórmula:

$$TPROP_{i,u} = P_{i,u} + ELAS_u + ITER_u$$

Donde, $TPROP_{i,u}$ es la probabilidad total; $P_{i,u}$ es la idoneidad de localización de cada celda para cada uso/cobertura de suelo u , que viene de la aplicación de modelos de regresión logística para las coberturas del período 1998 al 2018; $ELAS_u$ corresponde a la elasticidad de cada uso/cobertura de suelo definida por la dinámica de cambio de uso de suelo, y que fluctúa entre valores 1 (rápida conversión) a 0 (sin modificación); $ITER_u$ corresponde al factor de probabilidad determinada por la demanda de uso/cobertura de suelo anual. Los valores de las elasticidades se indican en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros de elasticidades utilizadas en el modelo Dyna-CLUE

Tipo de escenario	Urbano	Parcelas de agrado	Suelo desnudo	Agrícola	Bosque	Cobertura nival	Agua
Tendencial BAU	1	0,5	0,8	0,8	0,8	1	1
Nueva vialidad proyectada	1	0,5	0,8	0,7	0,8	1	1

La matriz de conversiones es usada para parametrizar las relaciones y transformaciones entre los diferentes usos y coberturas de suelo, que son definidas como reglas de conversiones de usos de suelo. Estas reglas de conversión fueron trabajadas en una matriz de 7x7, donde las relaciones directas de los usos de suelo t_1 implican un cambio en el uso de suelo t_2 adquiere valor 1, y si la probabilidad que el uso de suelo t_1 no cambie a una nueva condición de uso de suelo t_2 o se mantenga su misma categoría recibe un valor 0.

Para efectos de este estudio, se procedió a generar dos modelos distintos considerando los dos escenarios propuestos para 2035 y 2065. Los escenarios fueron:

- Escenario tendencial o *business as usual* (BAU): permite simular el cambio de uso/cobertura de suelo al 2065 con base en la tendencia observada en el período 1998-2018.
- Escenario de nueva vialidad proyectada: incorpora desde 2035 hacia 2065 los nuevos proyectos viales que el Estado de Chile desea desarrollar en la zona

lacustre de la conurbación Villarrica-Pucón. Estos corresponden a dos proyectos: “Ruta de Villarrica - Segunda Faja” (MOP 2022) y “Ruta Pedregoso - Pucón” (MOP 2016), que se esperan que estén en operación a comienzos del 2030 (Véase Figura 1). Para ello, se actualizó y recalculó la fuerza motriz de distancia a vialidad estructurante, incluyendo las dos nuevas rutas en torno al lago desde 2035. Además, se consideró la demanda de parcelas de agrado entre 2009-2018 de acuerdo a los datos del SAG, donde se calculó el porcentaje de crecimiento de hectáreas aprobadas para las comunas de Villarrica y Pucón.

La validación del modelo Dyna-CLUE se realizó mediante el método Figura de Mérito (FOM) (Pontius et ál., 2008), utilizando: los mapas de uso/cobertura de suelo clasificados para 1998 y 2018, y una simulación para 2018 generada con los mismos parámetros del escenario tendencial. Para este estudio, se obtuvo un FOM de 18,5 % y

los indicadores de Exactitud del Usuario y Exactitud del Productor fueron de 25,2 % y 37,1 %, respectivamente.

Resultados

Trayectoria de los usos y coberturas de suelo

Entre 1998 y 2018, se observó un crecimiento significativo de las áreas urbanas, con un aumento de 6.000 ha que casi triplicó su superficie inicial. No obstante, el crecimiento más destacado correspondió al urbano de baja densidad (parcelas de agrado), que superó 100 veces su valor original (Tabla 5). Este fenómeno se explica por: (i) normativas de subdivisión —el Decreto Ley 3516 establece un tamaño mínimo de 5.000 m² para parcelas rurales—, y (ii) los patrones de expansión —las áreas urbanas crecieron alrededor del centro principal, mientras las parcelas de agrado se concentraron cerca de vías de conexión y el lago Villarrica—. Por tanto, existe una tendencia de expansión hacia las áreas periurbanas en ambas ciudades.

Tabla 5. Distribución de los usos/coberturas de suelo (1998 y 2018)

Usos/coberturas de suelo	Superficie (ha)			Tasa de crecimiento (%)	
	1998	2008	2018	1998-2008	2008-2018
Urbano alta y media densidad	390,8	738,2	981,9	0,9	0,3
Urbano baja densidad (parcelas de agrado)	31,8	463,3	3.243,3	13,5	6,0
Suelo desnudo	6.332,5	6.413,7	5.574,9	0,0	-0,1
Agrícola	87.268,7	86.536,3	85.947,8	0,0	0,0
Bosque	64.587,6	64.459,9	62.863,5	0,0	0,0
Agua	20.109,2	20.109,2	20.109,2	0,0	0,0
Cobertura nival	1.316,3	1.316,3	1.316,3	0,0	0,0
Superficie total (ha)	180.036,8	180.036,8	180.036,8		

Nota: elaboración propia a partir de la clasificación supervisada de imágenes Landsat (1998, 2008, 2018).

Los usos/coberturas que cedieron terreno frente a la expansión urbana fueron, en orden de magnitud: bosque (-19.021 ha), suelo agrícola (-14.857 ha) y suelo desnudo (-7.351 ha). Estas pérdidas se asociaron principalmente al reemplazó de suelos desnudos y agrícolas por el uso urbano de alta/media densidad y el avance de las parcelas de agrado sobre las áreas agrícolas, bosques y suelos desnudos.

Análisis de las fuerzas motrices

El análisis de regresión logística de las fuerzas motrices en función de los usos/coberturas de suelo para

2018 y 2035, indica que en términos generales para los cinco usos/coberturas de suelo analizados, tienen una alta relación con las variables independientes (fuerzas motrices) analizadas. Esto se aprecia en que tanto los valores de ROC son mayores a 0,85, y los valores de pseudo R² son mayores a 0,2. Solo para el caso del uso parcelas de agrado para el 2035, este es inferior a este valor.

En este sentido, existe una fuerte relación positiva entre el uso urbano y la distancia al lago Villarrica, distancia al volcán Villarrica, densidad poblacional

y distancia a centros urbanos secundarios. Mientras que el resto de los factores muestran una relación negativa a excepción de la distancia a centros educacionales que el 2018 muestra una relación positiva y luego el 2035 negativa (Tabla 6).

Por su parte, las parcelas de agrado muestran una relación positiva con el factor distancia al sistema de Agua Potable Rural (APR), distancia al volcán Villarrica y distancia a centros urbanos secundarios. El resto de los factores muestran relaciones negativas.

Tabla 6. Resumen de los coeficientes de la ecuación (valores Beta) para el conjunto de variables predictoras (fuerzas motrices) del modelo de regresión logística para 2018 y 2035 (nueva vialidad proyectada)

Fuerzas motrices	Años	Usos/cobertura de suelo				
		Urbano	Parcelas de agrado	Suelo desnudo	Agrícola	Bosque
Intercepto	2018	-9.035	-5,903	-6,595	-6,849	-6,811
	2035	-9.467	-5,5892	-7,354	-7,574	-7,458
Vialidad estructurante	2018		-44,489			
	2035		-52,851			
Distancia a lago Villarrica y lago Huilipilún	2018	14,760				
	2035	15,335				
Atractivos turísticos	2018		-10,364			-6,002
	2035		-9,695			-5,968
Pendiente	2018	-2,423	-3,677	-5,033	-3,830	4,512
	2035	-1,224	-3,687	-5,470	-4,146	4,626
Agua Potable Rural (APR)	2018		7,643	14,793	-1,544	4,653
	2035		6,874	15,508	-2,661	4,492
Establecimientos educacionales	2018	67,672				
	2035	-49,881				
Establecimientos de salud	2018	-25,557				
	2035	-21,398				
Centro urbano principal (Villarrica y Pucón)	2018	-32,898				
	2035	-35,245				
Centro urbano secundario (Ñancul y Huiscapi)	2018	0,080	0,300			
	2035	1,557	0,714			
Densidad poblacional	2018	3,768				-46,758
	2035	4,024				-86,110
Tamaño predial	2018	-1,698	-0,976	0,492	1,405	
	2035	-1,672	-1,323	-0,7826	1,701	
Ríos principales	2018			-5,236		
	2035			-7,231		
Canales	2018		-7,137	-8,906	2,269	
	2035		-5,057	-9,432	3,373	
Comunidades indígenas	2018				8,702	
	2035				9,819	
Avalúo fiscal	2018				-18,179	
	2035				-28,340	
Capacidad de uso del suelo	2018	-3,506	-0,016	2,669	-2,102	3,496
	2035	-2,166	-0,425	4,626	-2,6162	4,029

Distancia al volcán Villarrica	2018	18,933	11,310			6,92
	2035	20,724	10,689			7,327
Intercepto	2018	-9.035	-5,903	-6,595	-6,849	-6,811
	2035	-9.467	-5,589	-7,354	-7,574	-7,458
Receiver Operating Characteristic ROC	2018	0,989	0,873	0,868	0,900	0,895
	2035	0,991	0,857	0,909	0,925	0,913
Pseudo R2	2018	0,708	0,214	0,256	0,447	0,410
	2035	0,728	0,193	0,314	0,515	0,452

Nota: los usos del suelo de cobertura nival y agua se mantuvieron constantes durante ambas modelaciones, por tanto, no tienen coeficientes para las regresiones, ya que no fueron modelados.

Escenario tendencial

El escenario tendencial proyectó la demanda futura de uso/cobertura de suelo para 2065 mediante regresión lineal simple, utilizando datos de 1998, 2008 y 2018. Los resultados (Figura 3) muestran que: el uso urbano de alta/media densidad aumentó un 14 % para 2065 respecto a

2018, con crecimiento constante, y el uso urbano de baja densidad (parcelas de agrado) registró un crecimiento exponencial (74 %), con un incremento inicial del 27 % (1998-2008). Esto sugiere que, hacia 2065, predominará la transición a parcelas de agrado, las cuales tendrán la mayor distribución espacial en el área de estudio.

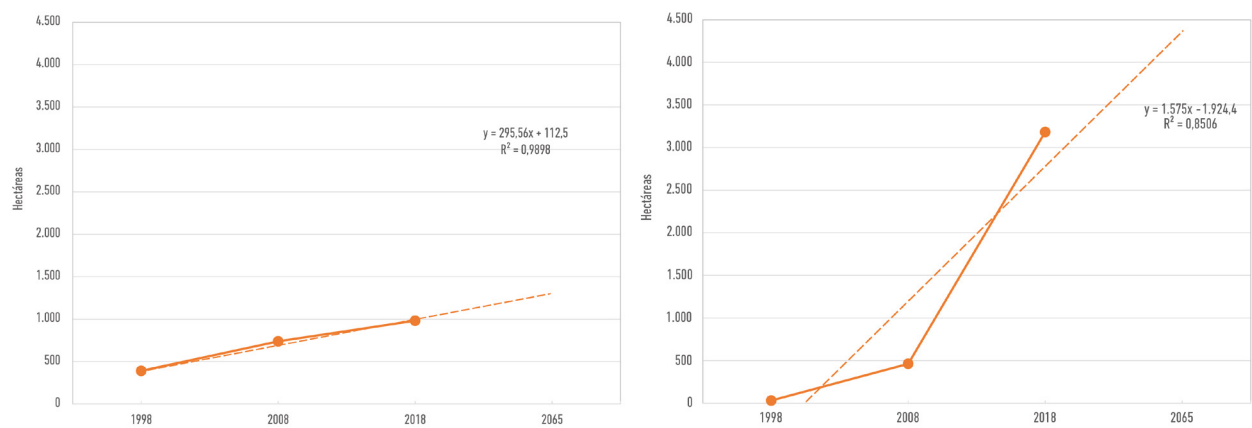


Figura 3. Evolución y proyección de la demanda de uso urbano (1998-2065), izquierda (alta y media densidad), derecha (baja densidad).

El análisis de las variaciones en los usos de suelo y sus proyecciones mediante regresión lineal simple permite establecer que, en el escenario tendencial, las superficies de suelo desnudo, agrícola y bosque presentan mayor probabilidad de transformación hacia usos urbanos de baja densidad. Esta transición se explica por la marcada tendencia de expansión que muestran las parcelas de agrado en el área de estudio. Cabe destacar que estos cambios generan impactos negativos significativos, ya que las coberturas originales (suelo desnudo, agrícola y bosque) proporcionan valiosos servicios ecosistémicos que se verían afectados por el proceso de urbanización.

Considerando estas demandas proyectadas y los parámetros del modelo descritos en la metodología, se realizó la simulación para 2035 y 2065 bajo el escenario tendencial (Figura 4). Los resultados muestran una consolidación de la mancha urbana en Villarrica y Pucón, con patrones espaciales diferenciados: en Villarrica se observa un patrón disperso (“sal y pimienta”) hacia el sur y el oeste, mientras que en Pucón el crecimiento sigue un patrón lineal a lo largo de la vía principal hacia Currarehue (este). Por otro lado, las parcelas de agrado presentan una clara concentración en dos zonas estratégicas: el borde sur del lago Villarrica y el espacio periurbano intermedio entre ambas ciudades (sector sur).

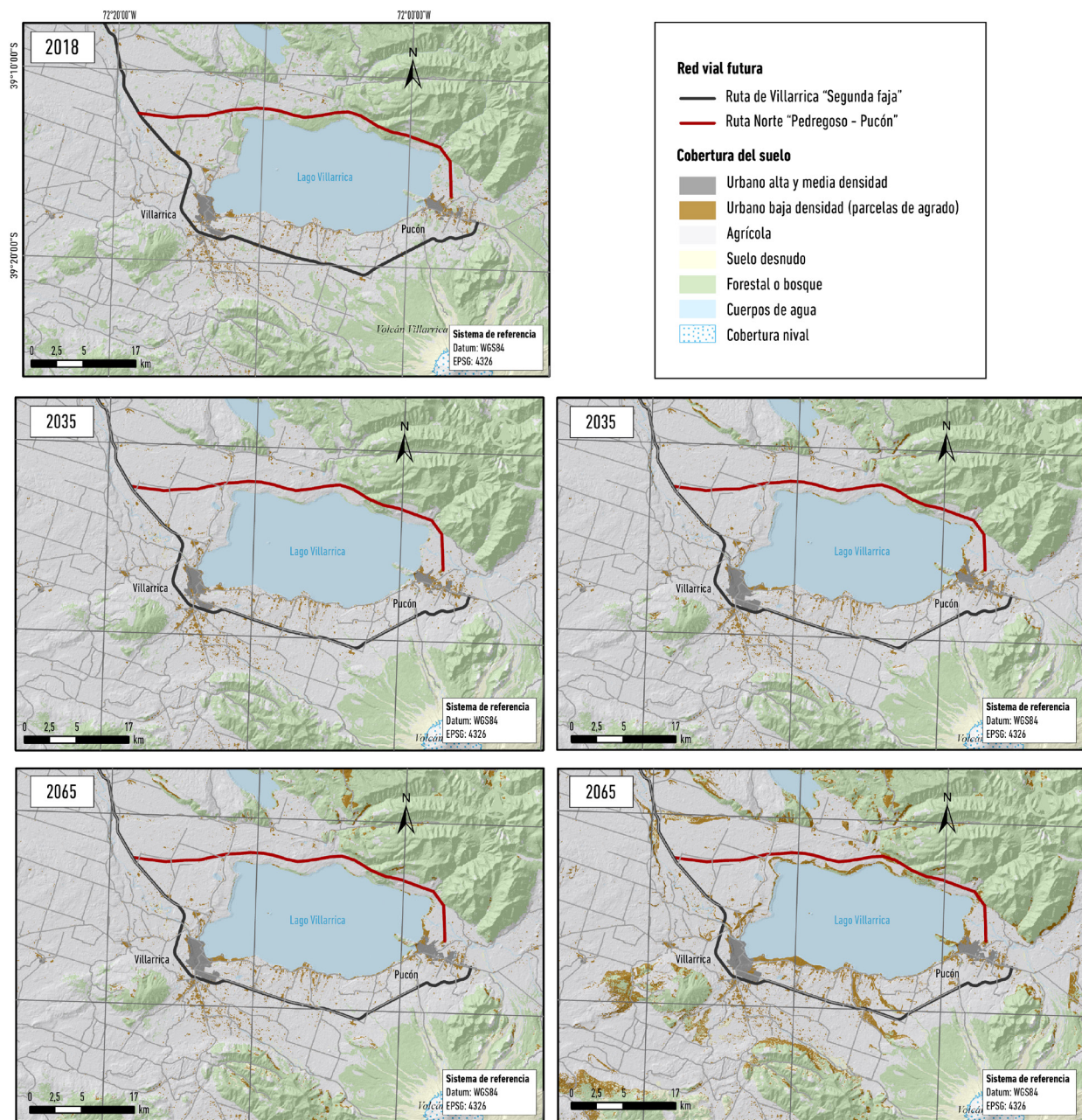


Figura 4. Distribución de usos y coberturas del suelo: situación actual (2018) y proyecciones para los escenarios tendencial (BAU) (izquierda) y de nueva vialidad (derecha) para los años 2035 y 2065.

Fuente: elaboración propia a partir de la clasificación supervisada de imágenes satelitales (2018) y modelización con Dyna-CLUE (2035, 2065).

Escenario con infraestructura de transporte

Para la construcción de este escenario, como se señaló anteriormente, se consideró la proyección lineal de parcelas de agrado de acuerdo con los datos proporcionados por el SAG y las nuevas infraestructuras viales proyectadas para la zona. Estas corresponden a:

- Proyecto Ruta de Villarrica - Segunda Faja: este proyecto pretende ser una solución vial para la conectividad entre las comunas de Freire, Villarrica y Pucón. Comprende mejoras a la ruta 199-CH, la cual durante épocas estivales presenta congestiones por la alta demanda turística del sistema

urbano Villarrica-Pucón y la construcción del *bypass* por el sur de las comunas de Villarrica y Pucón (ruta S-839), como una ruta paralela a la actual primera faja que bordea el lago Villarrica (MOP 2015; 2022).

- Proyecto Ribera Norte Lago Villarrica Ruta Pedregoso - Pucón: las características de emplazamiento del proyecto corresponden a la necesidad de mejorar la conectividad de la zona ribera norte del lago Villarrica (MOP 2016). Especialmente permite conectar los sectores de María Luisa (comuna de Villarrica) y el sector Río Turbio (comuna de Pucón), así como también ofrece una alternativa de conexión de la ruta 199-CH entre Freire Villarrica y los valles interiores de Caburgua, Curarrehue y el paso internacional Mamuil Mamal, evitando pasar por las ciudades de Villarrica y Pucón por sus altos niveles de congestión estival. La ruta ofrece una alternativa ante eventuales erupciones del volcán Villarrica y además permite consolidar el circuito turístico en torno al lago, como principal atractivo turístico de la región de La Araucanía.

El escenario también incorpora el análisis de los usos urbanos de baja densidad, que han experimentado un crecimiento sostenido desde 32 hectáreas en 1990 hasta alcanzar 3.208 hectáreas en 2018. Las proyecciones para 2065 indican que esta tendencia continuará, superando las 12.000 hectáreas, lo que equivale a ocho veces la superficie urbana actual.

Discusión

Los cambios urbanos observados, particularmente en el uso de baja densidad representado por las parcelas de agrado, muestran una tendencia creciente consistente con los registros del SAG. Entre 2009-2018, las parcelas autorizadas aumentaron de 1.037 a 3.056, con un promedio anual de 1.900 parcelas (equivalente a ~5.200 ha/año). Este fenómeno se sustenta en el Decreto con Fuerza de Ley (DFL) 3.516 (1980), que permite la subdivisión de predios rurales en lotes no inferiores a 0,5 ha, generando un proceso de periurbanización informal que conforma una “ciudad infiltrada” en áreas rurales (Naranjo 2009), transformando espacios agroproductivos y naturales en usos urbanos.

Este patrón no es exclusivo de Villarrica-Pucón, sino que se replica en otras zonas turísticas y metropolitanas de Chile. Por ejemplo, en Puerto Varas, las parcelas de

agrado pasaron de ser casi inexistentes en 2002 a más de 2.500 viviendas en 2017 (INE, IEUT y OCUC 2020). En Villarrica-Pucón, las viviendas en parcelas de agrado aumentaron de 1.165 (2002) a 3.279 (2017), con un crecimiento poblacional de 1.672 a 2.820 habitantes (INE, IEUT y OCUC 2020).

De acuerdo al informe del Instituto Nacional de Estadística junto al Instituto de Estudios Urbanos y Territoriales UC y el Observatorio de Ciudades UC (INE, IEUT y OCUC 2020), las parcelas de agrado son asentamientos humanos emplazados en el ámbito rural tradicional, pero pobladas por habitantes que inmigraron de entornos urbanos.

La pandemia por Covid-19 aceleró esta tendencia, impulsando migraciones urbanas-rurales, especialmente desde Santiago hacia zonas lacustres, como es el caso del lago Llanquihue (Gárate 2021). Las parcelas de agrado se comercializan como condominios privados o mediante loteos irregulares “loteos brujos”, donde predios se venden sin subdivisión legal¹ (Ministerio de Bienes Nacionales 2023). Este proceso va generando una serie de conflictos territoriales en cuanto a la pérdida de usos/coberturas de suelo agrícola y bosques, impacto en los ecosistemas naturales, mayor consumo de recursos, cambio en los modos de vida y de patrimonio rural y medioambientales como el problema de extracción de basura, así como también mayor demanda en otro tipo de infraestructuras y comodidades inherentes a entornos urbanos (INE, IEUT y OCUC 2020). Tal es el caso de la infraestructura de transporte, que permite conectar a este tipo de habitantes con los centros urbanos de distinta jerarquía que otorgan servicios básicos y especializados.

En relación a los escenarios simulados, se observa que existen diferencias espaciales entre el escenario tendencial BAU y el escenario que considera la nueva vialidad proyectada. Los patrones espaciales muestran una baja influencia del emplazamiento de los nuevos proyectos de infraestructura vial, como la Ruta del Villarrica - Segunda Faja (sector sur) y la Ruta Pedregoso - Pucón (Norte), sobre el uso urbano de baja densidad. Esto contradice a lo planteado por Abraham y Hunt (1999), donde los cambios de uso de suelo se ven fuertemente influenciados

1 Un propietario puede vender su terreno sin subdividir legalmente los sitios bajo los 5.000 m², es decir, las personas que compran no son dueños de manera legal ya que no tienen sus títulos de dominio inscritos.

por las fuerzas motrices asociadas a la infraestructura de transporte.

En el caso del escenario tendencial o BAU aplicado se proyecta un crecimiento moderado de uso urbano de baja densidad, sin un patrón tan evidente o distinto a lo observado el 2018. Mientras que en el escenario que considera las dos nuevas vías proyectadas se observa un mayor crecimiento de parcelas de agrado alrededor de todo el borde del lago Villarrica, quebradas y volcán, como es el caso del sector de Huincarara. Es decir, las dos nuevas vías ejercen una baja influencia en el emplazamiento de este tipo de uso de suelo en el área de influencia inmediata.

Es interesante notar que existe un fuerte rechazo al proyecto vial de Segunda Faja (Figura 5) por parte de la población, debido a los potenciales impactos que justamente pueden presentarse por la construcción de una autopista próxima a las parcelas de agrado existentes y por la presencia de comunidades indígenas en el sector (entrevistas con funcionarios municipales de Villarrica y Pucón). Esta vía se ha proyectado como una alternativa a la primera vía que bordea el lago Villarrica y que conecta la localidad de Villarrica con Pucón, como una forma de descongestionar el alto tráfico vehicular que se presenta en verano por los miles de turistas que llegan al sector.



Figura 5. Fotografía de la ruta actual donde se proyectaría la Segunda Faja.

Fotografía de Henríquez, octubre de 2019.

Nota: al fondo se observa un cartel de rechazo al proyecto.

Respecto al uso urbano de alta y media densidad se observa para las localidades de Villarrica y Pucón que existen variables relacionadas directamente con los usos urbanos, tales como los centros urbanos secundarios, la densidad poblacional y la distancia al volcán Villarrica. Para 2035 y 2060 se proyecta una extensión de la mancha urbana sobre las periferias urbanas de baja densidad, en especial en Pucón en el camino hacia el oriente. Esta tendencia de urbanización en torno a los caminos principales es similar a la observada en estudios realizados

en la misma región de la Araucanía, como es el caso de la ciudad de Temuco (Henríquez et ál. 2021; Maturana et ál. 2021).

Los procesos de urbanización fuera de los límites urbanos establecidos en el área de estudio han permitido que existan procesos de fragmentación espacial de los diferentes usos y coberturas de suelo. Esta tendencia se observa al analizar los grandes cambios en las tasas de crecimiento del uso urbano destinado a parcelas de agrado entre 1998-2018, así como el aumento

sostenido de la superficie urbana de alta densidad en el mismo periodo. Como se ha señalado, en lo que respecta a la normativa chilena que permite el desarrollo urbano fuera de los límites urbanos establecidos por los Instrumentos de Planificación Territorial (IPT), por ejemplo, los Planes Reguladores, destaca el artículo 55° de la Ley General de Urbanismo y Construcciones y el mencionado DFL N° 3.516 que permite la subdivisión de predios rústicos en superficies rurales inferiores a 5.000 m² y cuya autorización la otorga el SAG (Ministerio de Agricultura). Estos son considerados como factores no-espaciales que inciden en un aumento de la demanda de suelo agrícola para actividades urbanas (Salazar y Cox 2014; Maturana et ál. 2021). Así, se evidencia como los usos urbanos (alta y media densidad y parcelas de agrado) se movilizan desde los centros urbanos consolidados hacia áreas de valor natural y ecológico, como también hacia zonas con alto grado de amenaza volcánica (volcán Villarrica).

El modelo Dyna-CLUE aplicado a las áreas urbanas del Lago Villarrica ha permitido evidenciar las tendencias de expansión urbana aceleradas hacia actuales zonas agrícolas y naturales. Así, este tipo de modelos permite estimar de forma compleja como las actuales tendencias de ocupación del territorio delinean los cambios futuros de los usos y coberturas de suelo, como lo demuestran autores como Mas et ál. (2014).

Se puede advertir que gran parte de los estudios que aplican modelos de análisis de uso de suelo e infraestructura de transporte lo hacen a una escala urbana o regional (Wegener 2004; Kang y Kim 2019; An y Lee 2020; Wenner y Thierstein 2022), fuertemente centrados en servicios, atracción de viajes y niveles de tráfico (Tal, Theodory y Bazlamit 2022), pero sin centrarse en las lógicas de periurbanización entre ciudades medias. Por este motivo, es difícil establecer comparaciones con otros estudios, especialmente porque usan variables y métodos distintos.

En este sentido, el estudio de Wenner y Thierstein (2022) evalúan el impacto de 232 estaciones de tren de alta velocidad en Europa en el cambio de uso de suelo en sus entornos a través de un análisis descriptivo. Aquí se compara la situación antes y después de la construcción de las estaciones, demostrando que estaciones bien conectadas con el transporte público regional y local están asociadas a una mayor tasa de cambio de uso de suelo, mientras que estaciones más periféricas a regiones metropolitanas difícilmente generan atracción.

A un nivel intraurbano An y Lee (2020) aplican un modelo de desagregación espacial en base a regresión logística binaria para predecir el cambio de uso de suelo

a largo plazo a partir de la extensión de sistemas de transporte (como metro, calles y autopistas) en el Área Metropolitana de Seúl. Este estudio demuestra que hay un 80,4 % de probabilidad de desarrollo de celdas después de la extensión del sistema de transporte. En un caso aplicado a la misma metrópoli, Kang y Kim (2019) evalúan el efecto de un uso masivo futuro de vehículos autónomos en el cambio de uso de suelo en el área central de la metrópoli. Este estudio utiliza el método de simulación en base a células para ilustrar el potencial cambio de uso de suelo urbano por el efecto del uso a gran escala de vehículos autónomos. Las variables utilizadas para la simulación fueron la accesibilidad, precio del suelo, accesibilidad a áreas verdes y el efecto en el uso de suelo de barrios. Los resultados de este estudio demuestran que las áreas agrícolas disminuirán, mientras que las áreas comerciales y residenciales se expandirán. Desde una perspectiva espacial y descriptiva, Chen et ál. (2023) desarrollan un análisis del impacto del cambio de uso de suelo en el servicio ecosistémico en Wuling Mountain, China, desde la perspectiva del desarrollo de los sistemas de transporte. El estudio demuestra que los sistemas de transporte y políticas de uso de suelo generaron una influencia importante en el cambio de uso de suelo entre 2000 y 2020 en el área de estudio.

Un caso de estudio, también en China, busca entender el impacto de los sistemas de trenes urbanos en el uso de suelo y predecir sus impactos en el futuro en el caso de Wuhan, a través del método multinomial logit (MNL) y un modelo de asignación de uso del suelo (Zhao y Shen 2019). En este estudio, el modelo propuesto puede predecir con un 92,1 % de probabilidad el cambio de uso de suelo. Los resultados indican que la proximidad a estaciones de tren son claves para promover el crecimiento de superficies con roles comerciales, institucionales y residenciales.

Estudios recientes demuestran el constante esfuerzo para generar modelos eficientes para determinar la relación entre el uso de suelo y el transporte (Iacono y Levinson 2009; Fatmi y Habib 2015; Ayazli et al. 2015; Bhattacharjee y Goetz, 2016; Guzman 2018). Las metodologías varían desde modelos gravitacionales hasta econométricos, con tratamientos estadísticos complejos, que, a pesar de generar una contribución al avance del conocimiento en estas temáticas, todavía hay poca aplicabilidad de los modelos existentes en la generación de políticas que promueven la construcción de ciudades sostenibles (Iacono, Levinson y El-Geneidy

2008; Waddell et ál. 2007). Un estudio realizado en Beijing demuestra que la tendencia actual a mejorar la accesibilidad del transporte en la periferia de la ciudad provoca más desplazamientos de larga distancia (Zhao, Lü y Roo 2010). En particular, los grandes proyectos de carreteras podrían provocar una mayor congestión del tráfico en el centro.

A nivel nacional, modelos cambio de uso y cobertura de suelo aplicando Dyna-CLUE han sido empleados en otras aglomeraciones urbanas de mayor tamaño (Henríquez et ál. 2021; Henríquez et ál. 2023), así como para otras áreas del sur de Chile (Manushevich y Beier 2016; Gimeno et ál. 2022), pero sin relacionar la vialidad y los sistemas de transporte.

En ese sentido, tanto la experiencia científica revisada como los resultados obtenidos por este estudio evidencian que la generación de modelos espacialmente explícitos permite la comprensión de las tensiones que ocurren en el territorio, tanto a nivel regional (demandas suelo urbano producto de la autorización de parcelas de agrado fuera del límite urbano) y a nivel local (correlaciones de las fuerzas motrices con cada tipo de uso y cobertura de suelo). También, la generación de dos escenarios (tendencial y nueva vialidad proyectada) permite establecer directrices para los diferentes tomadores de decisiones relacionados con la planificación urbana, tanto a escala regional como local.

Sin embargo, el principal rasgo del sistema actual de planificación urbana en Chile es la aplicación expedita de los principios económicos del libre mercado en las labores de control y planificación urbana. Un ejemplo de ello es el principio de la liberalización del mercado de suelo bajo el amparo de la Política Nacional de Desarrollo Urbano de 1980, del MINVU. Tal principio, reconocía al suelo urbano como un recurso no escaso y cuyo valor estaba regido por las fuerzas del mercado (Hidalgo y Arenas 2003). Posteriormente, la Política de Desarrollo Urbano (PNDU) de 1985 rectificó en parte lo anterior, reconociendo al suelo urbano como un recurso escaso. En la actualidad si bien hay una nueva PNDU (2014) basada en principios orientadores de sustentabilidad y calidad de vida, las dinámicas de cambio de uso de suelo en áreas rurales y periurbanas siguen siendo aceleradas y poco reguladas. Esto es especialmente importante para esta área de estudio, ya que históricamente se fue talando el bosque nativo transformando esta cobertura a usos agrícolas y ganaderos, para luego en la actualidad observar un rápido e irreversible cambio a un uso urbano.

Conclusiones

Los modelos espacialmente explícitos son herramientas valiosas para la planificación territorial, especialmente en aplicaciones relacionadas con el transporte. Los resultados obtenidos revelan que las nuevas vías proyectadas tendrían escasa influencia en el área de estudio, así como en los futuros usos urbanos de baja densidad o parcelas de agrado dentro de su zona de influencia inmediata. Esto sugiere que los patrones de localización asociados al proceso de parcelación responden a otros factores, como la presencia de amenidades naturales y turísticas —por ejemplo, la proximidad al lago, el volcán o los ríos—. Es probable que existan variables no evaluadas, como la calidad paisajística o la visibilidad de atractivos turísticos, que deberían incorporarse en futuros modelos.

Todo indica que el crecimiento urbano continuará en aumento, impulsado principalmente por la expansión de parcelas de agrado y el flujo de habitantes que buscan escapar de las grandes ciudades en busca de entornos naturales y paisajes de calidad, como los que ofrece esta zona. A ello se suma el fenómeno migratorio por el Covid-19, potenciado por el teletrabajo y la buena conectividad, que ha incrementado el atractivo de estas áreas. Este escenario generará una mayor presión sobre la infraestructura vial, debido al aumento de parcelaciones y, con ello, de vehículos particulares. En consecuencia, es previsible que los problemas de congestión persistan, especialmente durante el verano, en el corredor sur del lago Villarrica entre Villarrica y Pucón. Asimismo, la periurbanización acelerada en esta zona eleva la exposición al riesgo volcánico.

La secuencia de cambios de uso y cobertura del suelo analizada constituye un proceso irreversible: cuando un terreno natural o rural —como bosques, cultivos o suelos desnudos— se transforma en urbano, las posibilidades de reconversión son prácticamente nulas, lo que acarrea graves impactos ambientales.

En conclusión, los procesos de periurbanización son complejos y no dependen exclusivamente de las nuevas infraestructuras de transporte. Para comprender cabalmente su distribución geográfica y los impactos asociados, es necesario profundizar en otros factores explicativos, incorporando especialmente las dimensiones sociales y ambientales del territorio.

Agradecimientos

Esta investigación se enmarca dentro del Proyecto Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID)/Fondo

Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDECYT) Regular N° 1220688. “¿Qué nos depara el Antropoceno Urbano?: Aportes de los modelos espaciales predictivos al sistema urbano chileno” y el Proyecto ANID/FONDECYT Regular N° 1180268. Se destaca el apoyo proporcionado por el Centro de Desarrollo Urbano Sustentable, CEDEUS, ANID/FONDAP (Fondo de Financiamiento de Centros de Investigación en Áreas Prioritarias) 1523A0004. Se agradece especialmente a los funcionarios municipales y a los profesionales del Ministerio de Obras Públicas (MOP) entrevistados.

Referencias

- Abarca, Vasti. 2022. “Puerto Varas y Valdivia: protagonistas de la nueva ola migratoria al sur del país”. *Diario de Valdivia*. <https://www.diariodevaldivia.cl/noticia/reportajes/2022/07/puerto-varas-y-valdivia-protagonistas-de-la-nueva-ola-migratoria-al-sur-del-pais>
- Abraham, John E. y John Douglas Hunt. 1999. “Policy Analysis Using the Sacramento MEPLAN Land Use-Transportation Interaction Model”. *Transportation Research Record* 1685 (1): 199-208. <https://doi.org/10.3141/1685-25>
- Abreu, Mauricio de A. 2008. *Evolução urbana do Rio de Janeiro*. Río de Janeiro: Instituto Pereira Passos.
- Acheampong, Ransford A. y Elisabete Silva. 2015. “Land Use-Transport Interaction Modeling: A Review of the Literature and Future Research Directions”. *Journal of Transport and Land Use* 8 (3): 11-38. <https://doi.org/10.5198/jtlu.2015.806>
- Adams, John. 1970. “Residential Structure of Mid-western Cities”. *Annals of the Association of American Geographers* 60 (1): 37-62. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.1970.tb00703.x>
- Agarwal, Chetan, Glen M. Green, J. Morgan Grove, Tom P. Evans y Charles M. Schweik. 2002. “A Review and Assessment of Land-Use Change Models: Dynamics of Space, Time and Human Choice”. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Station. <https://doi.org/10.2737/NE-GTR-297>
- An, Youngsoo y Seungil Lee. 2020. “A Spatial Disaggregation Model to Improve Long-Term Land Use Forecasting with Transport Models Based on Zonal Data”. *Applied Spatial Analysis and Policy* 13: 187-208. <https://doi.org/10.1007/s12061-019-09298-3>
- Araucanía Noticias. 2018. “Ampliación de ruta S-839 Segunda Faja al Volcán Villarrica, Región de la Araucanía”. Consultado el 23 de mayo de 2022. <https://www.icafo.cl/proyecto/ampliacion-ruta-s-839-segunda-faja-al-volcan-villarrica-region-de-la-araucania/>
- ASF DAAC (Alaska Satellite Facility Distributed Active Archive Center). 2014. “ALOS PALSAR Low Resolution Radiometric Terrain Corrected Product”. *Dataset. NASA Earthdata*. <https://doi.org/10.5067/JBYK3J6HFSVF>
- Ayazli, Ismail, Fatmagul Kilic, Steffen Lauf, Hulya Demir y Birgit Kleinschmit. 2015. “Simulating Urban Growth Driven by Transportation Networks: A Case Study of the Istanbul Third Bridge”. *Land Use Policy* 49: 332-340. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.08.016>
- Banister, David. 2008. “The Sustainable Mobility Paradigm”. *Transport Policy* 15 (2): 73-80. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2007.10.005>
- Bhattacharjee, Sutapa y Andrew Goetz. 2016. “The Rail Transit System and Land Use Change in the Denver Metro Region”. *Journal of Transport Geography* 54: 440-450. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2016.02.004>
- CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales). 2013. “Predios rurales”. [Datos cartográficos digitales]. *Biblioteca Digital CIREN*. <https://www.ciren.cl/productos/propiedades-rurales/>
- Cervero, Robert. 2013. “Linking Urban Transport and Land Use in Developing Countries”. *Journal of Transport and Land Use* 6 (1): 7-24. <https://doi.org/10.5198/jtlu.v6i1.425>
- Chen, Yu, Yilian Liu, Shengfu Yang y Chengwu Liu. 2023. “Impact of Land-Use Change on Ecosystem Services in the Wuling Mountains from a Transport Development Perspective”. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 20 (2): 1323. <https://doi.org/10.3390/ijerph20021323>
- CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales). 2014. “Clases de usos”. [Datos cartográficos digitales]. *Biblioteca Digital CIREN*. <https://www.ciren.cl/productos/suelos-agrologicos/>
- Clark, William A. V. y Peter L. Hosking. 1986. *Statistical Methods for Geographers*. New York: Wiley.
- Comisión Nacional de Riego. 2021. “Canales”. Conjunto de datos geoespaciales. *Infraestructura de Datos Geoespaciales de Chile (IDE Chile) – Geoportal*. Consultado el 23 de mayo de 2025. <https://www.geoportal.cl/geoportal/catalog/35912/Canales%20de%20Riego>
- CONADI (Corporación Nacional de Desarrollo Indígena). 2021. Áreas de Desarrollo Indígena. *Sistema Integrado de Información CONADI SIIC*. Consultado el 3 de julio de 2022. <https://siic.conadi.cl/>
- Dirección General de Aguas. 2019. “Inventario público de cuencas hidrográficas y lagos”. *Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile*. Consultado el 23 de mayo de 2025. <https://dga.mop.gob.cl/servicios-de-informacion/catastro-publico-de-aguas/inventario-publico-de-cuencas-hidrograficas-y-lagos/>

- Dirección General de Aguas. 2021. "Mapoteca Digital". *Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile*. Consultado el 23 de mayo de 2025. <https://dga.mop.gob.cl/mapoteca-digital/>
- Dubovyk, Olena, Richard Sliuzas y Johannes Flacke. 2011. "Spatio-Temporal Modelling of Informal Settlement Development in Sancaktepe District, Istanbul, Turkey". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 66 (2): 235-246. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2010.10.002>
- Fatmi Rahman, Mahmudur y Muhammad Habib Ahsanul. 2015. "Spatial Transferability of a Microresidential Mobility Model in the Integrated Land Use, Transportation, and Environment Modeling System". *Transportation Research Record* 2494 (1): 29-36. <https://doi.org/10.3141/2494-04>
- Gárate, Tomás. 2021. "#Mi Territorio: un nuevo desafío con responsabilidad compartida". *Elmostrador*, 13 de octubre, 2021. <https://www.elmostrador.cl/noticias/opinion/columnas/2021/10/13/miterritorio-un-nuevo-desafio-con-responsabilidad-compartida/>
- Gimeno, Fernando, Marcelo Galleguillos, Daniela Manushevich y Mauricio Zambrano-Bigiarini. 2022. "A Coupled Modeling Approach to Assess the Effect of Forest Policies in Water Provision: A Biophysical Evaluation of a Drought-Prone Rural Catchment in South-Central Chile". *Science of The Total Environment* 830: 154608. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154608>
- Guerra, Erick, Camilo Caudillo, Paavo Monkkonen y Jorge Montejano. 2018. "Urban Form, Transit Supply, and Travel Behavior in Latin America: Evidence from Mexico's 100 Largest Urban Areas". *Transport Policy* 69: 98-105. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2018.06.001>
- Guzman, Luis. A. 2018. "A Strategic and Dynamic Land-Use Transport Interaction Model for Bogotá and its Region". *Transportmetrica B: Transport Dynamics* 7 (1): 707-725. <https://doi.org/10.1080/21680566.2018.1477636>
- Henríquez, Cristián. 2014. *Modelando el crecimiento de ciudades medias. Hacia un desarrollo urbano sustentable*. Santiago: Ediciones UC.
- Henríquez, Cristián, Lenin Henríquez-Dole, Esthela Salazar, Paulina Contreras, Pilar García y Jorge Qüense. 2021. "Cambios de uso de suelo en Temuco usando escenarios tendenciales y de planificación urbana". En *Entre Escalas, procesos y formas: producción y consumo en las ciudades iberoamericanas*, editado por Carmen Bellet, Evaraldo Santos Melazzo y Maria José Martinelli Silva Calixto, 95-115. Curitiba: Appris Editora.
- Henríquez, Cristián, Mauricio Morales, Jorge Qüense y Rodrigo Hidalgo. 2023. "Future Land Use Conflicts: Comparing Spatial Scenarios For Urban-Regional Planning". *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science* 50 (2): 332-349. <https://doi.org/10.1177/23998083221111404>
- Hidalgo, Rodrigo y Federico Arenas. 2003. "Vivienda y ciudad para todos. Utopías y realidades de las políticas habitacionales en Chile en la segunda mitad del siglo XX". *Revista Tiempo y Espacio* 13: 113-131.
- Iacono, Michael, David Levinson y Ahmed El-Geneidy. 2008. "Models of Transportation and Land Use Change: A Guide to the Territory". *Journal of Planning Literature* 22 (4): 323-340. <https://doi.org/10.1177/0885412207314010>
- Iacono, Michael y David Levinson. 2009. "Predicting Land Use Change: How Much Does Transportation Matter?". *Transportation research record* 2119 (1): 130-136. <https://doi.org/10.3141/2119-16>
- INE, IEUT y OCUC (Instituto Nacional de Estadísticas, Instituto de Estudios Urbanos y Territoriales de la Pontificia Universidad Católica de Chile y Observatorio de Ciudades UC). 2020. *Parcelas de agrado desde la perspectiva censal y territorial. Casos Regionales*. Consultado el 20 de octubre de 2021. https://geoarchivos.ine.cl/File/pub/Parcelas%20de%20agrado%20desde%20la%20perspectiva%20censal%20y%20territorial_%20Regiones.pdf
- INE (Instituto Nacional de Estadísticas). 2017. "Censo de Población y Vivienda 2017". [Conjunto de datos]. Consultado el 23 de mayo de 2025. <https://www.ine.gob.cl/estadisticas/sociales/censos-de-poblacion-y-vivienda/censo-de-poblacion-y-vivienda>
- INE (Instituto Nacional de Estadísticas). 2017. "Censo de población y vivienda 2017". <http://www.censo2017.cl/servicio-de-mapas/>
- Jones, Peter. 2014. "The Evolution of Urban Mobility: The Interplay of Academic and Policy Perspectives". *IATSS Research* 38 (1): 7-13. <https://doi.org/10.1016/j.iatssr.2014.06.001>
- Kamusoko, Courage. 2017. "Importance of Remote Sensing and Land Change Modeling for Urbanization Studies". En *Urban Development in Asia and Africa: Geospatial Analysis of Metropolises*, editado por Yuji Murayama, Courage Kamusoko, Akio Yamashita y Ronald C. Estoque, 3-10. Singapore: Springer.
- Kang, Na-Yoon y Youngchul Kim. 2019. "Potential of Urban Land Use by Autonomous Vehicles: Analyzing Land Use Potential in Seoul Capital Area of Korea". *IEEE Access* 7: 101915-101927. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2929777>
- Kii, Masanobu, Hitomi Nakanishi, Kazuki Nakamura y Kenji Doi. 2016. "Transportation and Spatial Development: An overview and a Future Direction". *Transport Policy* 49: 148-158. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2016.04.015>
- Manushevich, Daniela y Colin M. Beier. 2016. "Simulating Land Use Changes Under Alternative Policy Scenarios for Conservation of Native Forests in South-Central Chile". *Land Use Policy* 51: 350-362. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.08.032>

- Mas, Jean-François, Melanie Kolb, Martin Paegelow, María Teresa Camacho Olmedo y Thomas Houet. 2014. "Inductive Pattern-Based Land Use/Cover Change Models: A Comparison of Four Software Packages". *Environmental Modelling and Software* 51: 94-111. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.09.010>
- Maturana, Francisco, Mauricio Morales, Fernando Peña-Cortés, Marco A. Peña y Carlos Vielma. 2021. "Urban Growth, Real Estate Development and Indigenous Property: Simulating the Expansion Process in the City of Temuco, Chile". *ISPRS International Journal of Geo-Information* 10 (2): 101. <https://doi.org/10.3390/ijgi10020101>
- Ministerio de Bienes Nacionales. 2023. "¿Qué es un loteo irre-regular?". Consultado el 25 de junio de 2023. https://www.bienesnacionales.cl/?page_id=32965
- Ministerio de Educación. 2019. "Establecimientos de educación escolar". [Conjunto de datos geoespaciales]. *Infraestructura de Datos Geoespaciales de Chile (IDE Chile) – Geoportal*. Consultado el 23 de mayo de 2025. <https://www.geoportal.cl/geoportal/catalog/35408/Establecimientos%20Educa%20C3%B3n%20Escolar>
- MOP (Ministerio de Obras Públicas). 2015. "Grandes proyectos MOP 2016-2018. Informe". *Gobierno de Chile, Ministerio de Obras Públicas*. Consultado el 23 de mayo de 2025. https://www.mop.gob.cl/archivos/2021/10/Grandes_Proyectos_MOP_2016-2018.pdf
- MOP (Ministerio de Obras Públicas). 2016. "Estudio de prefactibilidad: Construcción conexión vial Ribera Norte Lago Villarrica, Pedregoso-Pucón". Santiago: Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas. Consultado el 23 de mayo de 2025. <https://asuntosindigenas.mop.gob.cl/archivos/sites/8/2023/10/PEDREGOSO-CI-Informe-final.pdf>
- MOP (Ministerio de Obras Públicas). 2017. "Agua Potable Rural (APR)". *Observatorio de la Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico – Dirección de Obras Hidráulicas, Gobierno de Chile*. Consultado el 23 de mayo de 2025. <https://rest-sit.mop.gob.cl/arcgis/rest/services/DOH/APR/MapServer>
- MOP (Ministerio de Obras Públicas). 2020. "Red caminera de Chile". *Gobierno de Chile*. <http://www.mapas.mop.cl/>
- MOP (Ministerio de Obras Públicas). 2022. "Concesión Rutas del Villarrica". *Dirección General de Concesiones, Gobierno de Chile*. Consultado el 23 de mayo de 2022. <https://concesiones.mop.gob.cl/project/concesion-rutas-del-villarrica/>
- Ministerio de Salud. 2021. "Establecimientos de salud de Chile". *Infraestructura de Datos Geoespaciales de Chile (IDE Chile) – Geoportal*. Consultado el 23 de mayo de 2025. <https://www.geoportal.cl/geoportal/catalog/35499/Establecimientos%20de%20salud%20de%20Chile>
- MINVU (Ministerio de Vivienda y Urbanismo). 2020. "Área urbana de la[s] ciudades [de] chilena [Chile] 1993 - 2020". *IDE MINVU*, última actualización 26 de octubre de 2021. <https://ide.minvu.cl/maps/81f33821d6c84a378b8e754d9f2a6a45/about>
- Moreno, Hugo y Jorge Clavero. 2006. *Geología del volcán Villarrica. Regiones de la Araucanía y de los Lagos*. Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).
- Municipalidad de Pucón. 2016. *Plan de Desarrollo Comunal 2016 - 2020 (PLADECO)*. Pucón: Municipalidad de Pucón. <https://www.municipalidadpucon.cl/wp-content/uploads/2016/08/Pladeco2016-2020.pdf>
- Municipalidad de Villarrica. 2011. *Plan de Desarrollo Comunal 2011 -2020 (PLADECO)*. Villarrica: Municipalidad de Villarrica. https://www.munivillarrica.cl/wp-content/uploads/2019/08/pladeco_2011_o20.pdf
- Naranjo, Gloria. 2009. "El rol de la ciudad infiltrada en la reconfiguración de la periferia metropolitana de Santiago de Chile". *Estudios Geográficos* 70 (266): 205-229. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.o448>
- National Research Council. 2014. *Advancing Land Change Modeling: Opportunities and Research Requirements*. Washington: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/18385>
- Pontius, Robert Gilmore, Wideke Boersma, Jean-Christophe Castella, Keith Clarke, Ton de Nijs, Charles Dietzel, Zengqiang Duan, Eric Fotsing, Noah Goldstein, Kasper Kok, Eric Koomen, Christopher D. Lippitt, William McConnell, Alias Mohd Sood, Bryan Pijanowski, Snehal Pithadia, Sean Sweeney, Tran Ngoc Trung, A. Tom Veldkamp y Peter H. Verburg. 2008. "Comparing the Input, Output and Validation Maps for Several Models of Land Change". *The Annals of Regional Science* 42: 11-37. <https://doi.org/10.1007/s00168-007-0138-2>
- Pu, Ruiliang, Shawn Landry y Jingcheng Zhang. 2015. "Evaluation of Atmospheric Correction Methods in Identifying Urban Tree Species with WorldView-2 Imagery". *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 8 (5): 1886-1897. <https://doi.org/10.1109/jstars.2014.2363441>
- Puertas, Olga, Cristián Henríquez y Francisco Meza. 2014. "Assessing Spatial Dynamics of Urban Growth Using an Integrated Land Use Model. Application in Santiago Metropolitan Area, 2010-2045". *Land Use Policy* 38: 415-425. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2013.11.024>
- Rodrigue, Jean Paul, Claude Comtois y Brian Slack. 2013. *The Geography of Transport Systems*. Nueva York: Routledge.
- Salazar, Alejandro y Tomás Cox. 2014. "Accesibilidad y valor de suelo como criterios para una localización racional de vivienda social rural en las comunas de San Bernardo y Calera de Tango, Chile". *Revista INVI* 29 (80): 53-81. <http://doi.org/10.4067/S0718-83582014000100003>

- Santibáñez, Fernando. 2017. *Atlas Agroclimático de Chile. Estado actual y tendencias del clima*, tomo IV: Regiones del Biobío y de La Araucanía. Santiago: Universidad de Chile y Fundación para la Innovación Agraria (FIA).
- Schneider, Laura C. y Robert Gilmore Pontius. 2001. "Modeling Land-Use Change in the Ipswich Watershed, Massachusetts, USA". *Agriculture, Ecosystems and Environment* 85 (1-3): 83-94. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00189-X](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00189-X)
- Servicio de Impuestos Internos. 2021. "Cartografía digital mapas". Consultado el 01 de marzo de 2022. <https://www4.sii.cl/mapasui/internet/>
- SERNAGEOMIN (Servicio Nacional de Geología y Minería). 2021. "Portal GEOMIN". *Catálogo Nacional de Información Geológica y Minería*. <https://portalgeomin.sernageomin.cl/>
- SENATUR (Servicio Nacional de Turismo). 2021. "Atractivos Turísticos Nacionales." *Infraestructura de Datos Geoespaciales de Chile (IDE Chile) – Geoportal*. Consultado el 23 de mayo de 2025. <https://www.geoportal.cl/geoportal/catalog/35088/Atractivos%20Tur%C3%ADsticos%20Nacionales>
- Shahumyan, Harutyun y Rolf Moeckel. 2016. "Integration of Land Use, Land Cover, Transportation, and Environmental Impact Models: Expanding Scenario Analysis with Multiple Modules". *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science* 44 (3): 531-552. <https://doi.org/10.1177/0265813516647062>
- Shu, Bangrong, Honghui Zhang, Yongle Li, Yi Qu y Lihong Chen. 2014. "Spatiotemporal Variation Analysis of Driving Forces of Urban Land Spatial Expansion Using Logistic Regression: A case study of port towns in Taicang City, China". *Habitat International* 43: 181-190. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2014.02.004>
- Stewart, Ian D. y Tim R. Oke. 2012. "Local Climate Zones for Urban Temperature Studies". *American Meteorological Society* 93 (12): 1879-1900. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>
- Tal, Raed Al, Rawan Theodory y Subhi M. Bazlamit. 2022. "Assessing the Intersected Relationship Between Land Use and Transportation Planning". *Geography, Environment, Sustainability* 15 (4): 80-89. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2022-008>
- Trentin, Gracieli y María Isabel C. de Freitas. 2010. "Modelagem da dinâmica espacial urbana: modelo de autômato celular na simulação de cenários para o município de Americana-SP". *Revista Brasileira de Cartografia* 62: 291-305. <https://doi.org/10.14393/rbcv62no-43709>
- United Nations. 2019. *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision*. Nueva York: United Nations.
- USGS (United States Geological Survey). 2018. "Earth Explorer". <https://earthexplorer.usgs.gov>
- Vasconcellos, Eduardo. 2014. *Urban Transport Environment and Equity: The case for developing countries*. Londres: Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315071756>
- Verburg, Peter y Tom Veldkamp. 2002. "Modeling the Spatial Dynamics of Regional Land Use: The CLUE-S Model". *Environmental Management* 30: 391-405. <https://doi.org/10.1007/s00267-002-2630-x>
- Verburg, Peter, Tom Veldkamp y Jan Peter Lesschen. 2010. *The CLUE Model: Hands-On Exercises. Material de curso*. Instituto de Estudios Ambientales (IVM), Vrije Universiteit Amsterdam. Consultado el 23 de mayo de 2025. <https://spinlab.vu.nl/wp-content/uploads/2016/09/ExerciseClues.pdf>
- Waddell, Paul, Gudmundur Ulfarsson, Joel Franklin y John Lobb. 2007. "Incorporating Land Use in Metropolitan Transportation Planning". *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 41 (5): 382-410. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2006.09.008>
- Walpole, Ronald, Raymond Myers, Sharon Myers y Keying Ye. 2012. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. Ciudad de México: Pearson Educación.
- Wegener, Michael. 2004. "Overview of Land-use Transport Models". En *Handbook of Transport Geography and Spatial Systems*, editado por David Hensher, Kenneth Button, Kingsley Haynes y Peter Stopher, 127-146. Kidlington: Emerald Group Publishing. <https://doi.org/10.1108/9781615832538-009>
- Wenner, Fabian y Alain Thierstein. 2022. "High Speed Rail as Urban Generator? An Analysis of Land Use Change Around European Stations". *European Planning Studies* 30 (2): 227-250. <https://doi.org/10.1080/09654313.2021.1946485>
- Xia, Tian, Wenbin Wu, Qingbo Zhou, Wenxia Tan, Peter H. Verburg, Peng Yang y Liming Ye. 2018. "Modeling the Spatio-Temporal Changes in Land Uses and its Impacts on Ecosystem Services in Northeast China Over 2000-2050". *Journal of Geographical Sciences* 28: 1611-1625. <https://doi.org/10.1007/s11442-018-1532-7>
- Zhao, Liyuan y Le Shen. 2019. "The Impacts of Rail Transit on Future Urban Land Use Development: A Case Study in Wuhan, China". *Transport Policy* 81: 396-405. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2018.05.004>
- Zhao, Pengjun, Bin Lü y Gert de Roo. 2010. "Urban Expansion and Transportation: The Impact of Urban Form on Commuting Patterns on the City Fringe of Beijing". *Environment and Planning A* 42 (10): 2467-2486. <https://doi.org/10.1068/a4350>

Cristian Henríquez

Doctor en Ciencias Ambientales por la Universidad de Concepción (Chile), geógrafo por la Pontificia Universidad Católica de Chile y diplomado en Gestión Ambiental Municipal. Investigador del Centro de Cambio Global UC y Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CEDEUS). Profesor Titular del Instituto de Geografía de la Pontificia Universidad Católica de Chile. Sus principales líneas de investigación incluyen la sustentabilidad urbana, las ciudades medias y el análisis espacial del cambio de uso del suelo mediante técnicas geomáticas.

Mauricio Morales

Candidato a doctor en Ordenación del Territorio y Medio Ambiente de la Universidad de Zaragoza (España). Magíster en Gobernanza de Riesgos y Recursos por la Universidad de Heidelber (Alemania) y geógrafo por el Instituto de Geografía de la Pontificia Universidad Católica de Chile. Asistente de investigación en el Laboratorio de Transiciones Territoriales de la Zona Sur y Austral (LATSA). Sus líneas de investigación incluyen los sistemas de información geográfica (SIG) y Teledetección, el modelamiento de cambios del uso del suelo y la geoestadística.

Paulina Contreras

Geógrafa por la Pontificia Universidad Católica de Chile. Cuenta con diplomados en Estadística, Métodos Estadísticos y en Sistema de Información Geográfica Aplicada.

Camila Aguayo

Geógrafa por la Pontificia Universidad Católica de Chile. Posee un diplomado en Desarrollo Local Inclusivo y un curso de especialización en vuelo, fotogrametría y modelos 3D con dron. Sus principales líneas de investigación se centran en los instrumentos de planificación y el análisis territorial.

Vicente Aprigliano

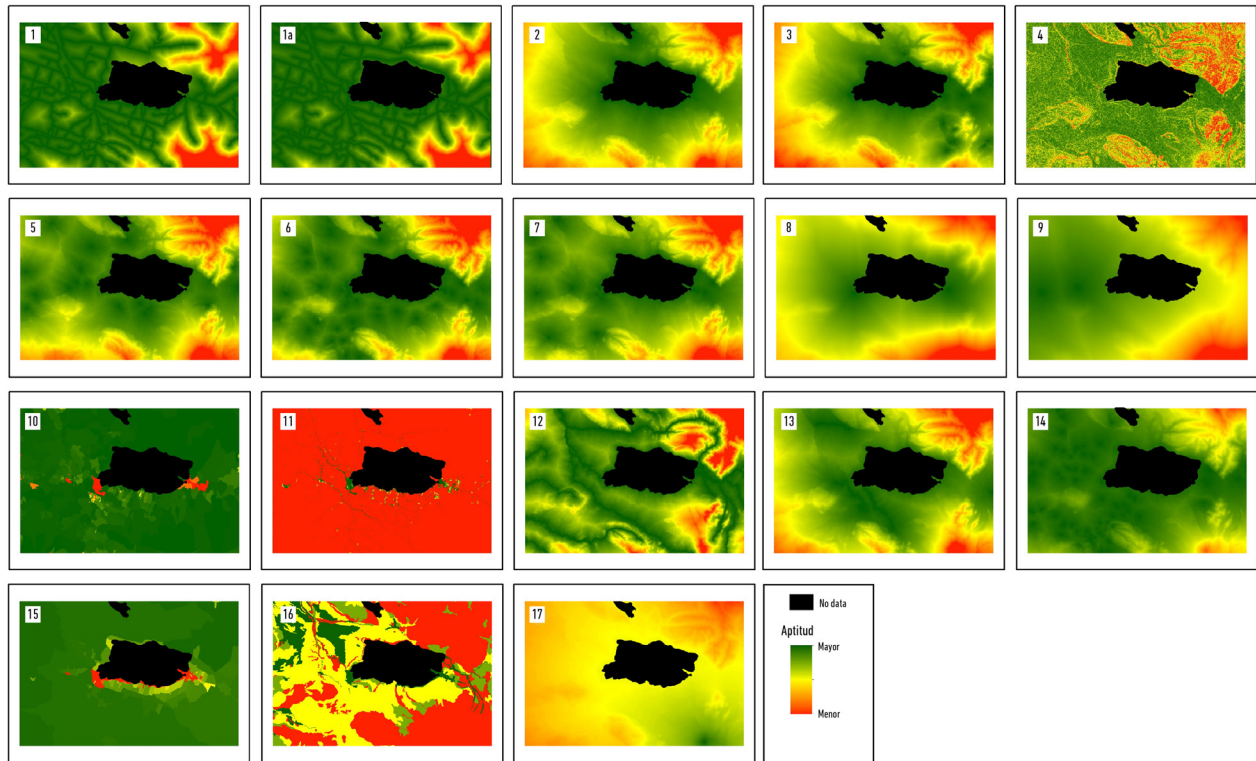
Doctor en Geografía por la Eberhard Karls Universität Tübingen (Alemania). Magíster en Ingeniería de Transporte y geógrafo por la Universidad Federal de Río de Janeiro (Brasil). Profesor de la Escuela de Ingeniería de Construcción y Transporte de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (Chile). Sus principales líneas de investigación son la movilidad sustentable, el transporte aéreo, el desarrollo territorial y logística.

Jorge Qüense

Doctor en Biodiversidad, Ecología y Medio Ambiente por la Université Joseph Fourier, Grenoble (Francia). Secretario Académico de la Facultad de Historia, Geografía y Ciencia Política, profesor asociado del Instituto de Geografía de la Pontificia Universidad Católica de Chile, investigador asociado del Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN) y jefe del Diplomado en Sistema de Información Geográfica (SIG).

Anexos

Anexo 1. Fuerzas motrices del modelo de cambio de uso de suelo



Nota: estas coberturas muestran el grado de aptitud de las diecisiete fuerzas motrices utilizadas en el modelo de simulación: 1 Distancia a la vialidad estructurante, 1a Distancia a la vialidad estructurante con fricción de costo (pendiente), 2 Distancia al lago Villarrica y lago Huilipilún, 3 Distancia a atractivos turísticos, 4 Pendiente, 5 Distancia a Agua Potable Rural (APR), 6 Distancia a establecimientos educacionales, 7 Distancia a establecimientos de salud, 8 Distancia al centro urbano principal (Villarrica y Pucón), 9 Distancia al centro urbano secundario (Ñancul y Huiscapi), 10 Densidad poblacional, 11 Tamaño predial, 12 Distancia a ríos principales, 13 Distancia a canales, 14 Distancia a comunidades indígenas, 15 Avalúo fiscal, 16 Capacidad de uso del suelo y 17 Distancia al volcán Villarrica.