

Impacto del cambio de uso de suelos sobre la erosión de los suelos de dos ecosistemas de Chile central

Ignacio Nuñez-Hidalgo

1 Resumen

La degradación del suelo es un problema que compromete la seguridad alimentaria y a los ecosistemas a escala global, y es causado principalmente por malas prácticas y el deficiente manejo y cambio de uso de suelos. Las regiones del mundo con mayores tasas de erosión se encuentran en África y Sudamérica, que son regiones que suelen destinar menos recursos a combatir la degradación de suelos. Es por esto, que en este estudio se propone la estimación de las tasas de erosión para Chile, mediante la aplicación de un modelo de cuantificación de la erosión del suelo basado en productos derivados de imágenes satelitales y percepción remota, para abarcar una ventana temporal de 18 años. Chile es un país sudamericano con una economía basada en la extracción de recursos naturales que presenta muy altos niveles de erosión nacional. Particularmente, se trabajará con dos ecosistemas iconicos asociados al bosque esclerófilo en Chile central, debido a que estos se encuentran muy presionados por el cambio de uso de suelos y además poseen altos niveles de endemismo.

Palabras clave: Erosión de los suelos, USLE, cambio global, cambio de uso de suelos, desertificación, pérdida de biodiversidad.

2 Introducción

El suelo es considerado un legado biológico y un recurso no renovable a escala humana ya que toma cientos o miles de años en formarse (Doran and Safley 1997; Doran 2002). Sin embargo, más del 30% de los suelos mundiales se encuentran severamente degradados, siendo la erosión la principal causa de degradación [montanarella2015status]. La degradación de los suelos no solo compromete la seguridad alimentaria sino también la integridad de los ecosistemas terrestres y las especies que los conforman (Keesstra et al. 2016; Karlen and Rice 2015; Robinson et al. 2017).

Los últimos cálculos estiman que a nivel mundial los suelos se degradan a una tasa de 35.9Pg/yr-1 (Borrelli et al. 2017) debido al manejo inadecuado y el cambio de uso de suelo (LULCC), ligadas al reemplazo de vegetación nativa por suelos agrícolas, ganaderos, forestales, mineros y urbanos, con un costo aproximado de USD\$ 400 billones, correspondientes a pérdidas equivalentes en productividad agrícola (Myers 1984; Pimentel et al. 1995; Montanarella 2015). De continuar esta tendencia, se espera que para el año 2050, cerca del 90% de los suelos del mundo se encuentren degradados (Montanarella et al. 2015), por lo que resulta urgente tomar medidas, no solo para identificar aquellas zonas más propensas a degradarse sino también para adoptar las medidas de manejo adecuadas para evitarlo, y a la vez para conservar los suelos como legado biológico.

Si bien el problema de degradación de suelos ocurre a nivel mundial, los problemas de erosión son aún más graves en regiones en vías de desarrollo como Latinoamérica, en donde prima una visión extractivista de los recursos naturales, que relaja la fiscalización y que ha favorecido la desigualdad social, incrementado la proliferación de actividades que aceleran el LULCC (Barahona-Segovia et al. 2019; Borrelli et al. 2017; Miranda et al. 2017). En Latinoamérica, Chile es un caso extremadamente delicado, al menos la mitad de sus suelos están severamente erosionados, y en algunas regiones los niveles de erosión llegan a más del 75%

de los suelos (Lagos, Espinoza, and Ortiz 1994), lo cual ha sido empeorado por la presencia de la industria forestal (Miranda et al. 2017). Considerando que la zona Mediterránea de Chile haya sido declarada como hotspot mundial de biodiversidad por poseer altos niveles de endemismo, se suma que el nivel de degradación de los suelos bordea el 70% (Lagos, Espinoza, and Ortiz 1994). Debemos también considerar que la pérdida de biodiversidad y ecosistemas conlleva también la degradación del suelo y su biodiversidad subterránea que es aun es poco conocida.

Bajo este escenario, es que se propone la estimación de las tasas de erosión a mediano plazo, abarcando el periodo entre los años 2001 a 2018 en todo Chile, para a) determinar los usos de suelo mas influyentes relacionados a la pérdida de suelo en Chile y b) determinar los factores de erosión más vinculados a la pérdida de suelos en dicho periodo. Sin embargo, como este documento se refiere a un análisis preliminar se limitará a: buscar relaciones significativas entre los usos de suelo para dos ecosistemas representativos de Chile Central (Bosque y matorral esclerófilo).

3 Metodología

Para estimar las tasas de erosión anual se trabajo con el modelo USLE de la USDA ((Wischmeier and Smith 1978). Que se descompone como sigue:

$$A = R * K * LS * C * P \text{ (Ecuación 1)}$$

Donde A corresponde a la tasa anual de erosión (ton/ha/yr), R a la erosividad de la lluvia (MJ / mm / ha), que equivale al poder erosivo de la lluvia por año (Bonilla and Vidal 2011), K a la erodabilidad del terreno (t / MJ / mm), que equivale a las propiedades fisicoquímicas del suelo a ser erosionado (Parveen and Kumar 2012; Panagos et al. 2017), LS al factor topográfico, que equivale a las propiedades topográficas (Panagos et al. 2015), C a la fracción vegetal, que equivale a la cobertura vegetal que protege al suelo de la erosión (Borrelli et al. 2018), y P a las practicas de manejo que son tomadas activamente para prevenir la erosión.

- El factor R se calculó como sigue:

$$R = 0.028 * P^{1.534} \text{ (Ecuación 2)}$$

Donde R corresponde al factor anual de erosividad, P a la precipitación anual, 0.028 y 1.534 a parámetros ajustados de precipitación para Chile.

- El factor K se calculó siguiendo el modelo EPIC (Sharpley and Williams 1990; Yang et al. 2018) basándose en el contenido de carbono orgánico, arcilla, limo y arena como sigue:

$$K = 0.1317 * \left(0.2 + 0.3 * e^{\left[-0.0256 * SAN \left(1 - \frac{SIL}{100} \right) \right]} * \left(\frac{SIL}{CLA + SIL} \right)^{0.3} \right) * \left[1 - \frac{0.25 * TOC}{TOC + e^{(3.72 - 2.95 * TOC)}} \right] * \left[1 - \frac{0.7 * SN_1}{SN_1 + e^{(22.9 * SN_1 - 5.51)}} \right]$$

Figure 1: Ecuación 3

Donde SIL equivale al contenido de limo, CLA al contenido de arcilla, SAN al contenido de arena, TOC al carbono orgánico del suelo y $SN_1 = 1 - SAN/100$.

- El factor LS se calculó a partir de SAGA-GIS, utilizando el método de (Desmet and Govers 1996) especial para zonas con topografía compleja y se estima como sigue:

$$LS = (A + D^{2m+1} - A^{m+1}) / (X^m * D^{m+2} * 22.13^m) \text{ (Ecuación 4)}$$

Donde A equivale a un modelo de acumulación de flujo o Flow accumulation, D al tamaño de píxel (250m), $X = \sin \theta + \cos \theta$, con θ equivalente al ángulo de exposición de la pendiente o Aspect, y $m = \frac{1}{\sin \theta + \cos \theta} + 1$, con $m = (((\sin \theta / 0.0896)) / ((0.56 + 3 * (\sin \theta) 0.8)))$, siendo θ equivalente a la pendiente o Slope en grados.

- El factor C fue estimado a partir de (Durigon et al. 2014) y fué estimado como sigue:

$$C = (-NDVI + 1) / 2 \text{ (Ecuación 5)}$$

Donde NDVI corresponde al índice normalizado de vegetación, que provee una estimación de la cobertura vegetal por píxel. El cálculo de este índice se realizó a partir de los meses de verano (21 de diciembre al 20 de marzo), utilizando productos MODIS MOD13Q1 con una imagen cada 16 días ponderadas por su media para el periodo completo.

- El factor P no fue estimado, y se asumió un valor de 1, que corresponde a un escenario pesimista en el cual son se estarían tomando acciones activas para prevenir la degradación y erosión del suelo (basado en (Bonilla and Vidal 2011)).

Se estimó una ecuación ULSE por año, entre los años 2001 a 2018. Las variables del factor R se utilizaron los productos grillados de CHELSA-CRUTS (Karger et al. 2017) resampleados a 250m. Tanto las variables del factor LS como C fueron obtenidas a través de Google Earth Engine, una plataforma libre, para análisis estadístico y geoespacial (Gorelick et al. 2017). Los productos grillados del factor K (Arena, Limo y Arcilla) fueron obtenidos desde Soilgrids (Hengl et al. 2017) mientras que el contenido de carbono orgánico fue obtenido por elaboración propia (Núñez-Hidalgo et al., in prep). Los factores fueron calculados directamente en R o mediante SAGA-GIS

Usos de suelo Se obtuvieron los usos de suelo anuales entre los años 2001 a 2018, los cuales fueron extraídos y adaptados de MODIS MCD12Q1. Se adaptó y simplificó la simbología de la clasificación IGBP, incluyendo la huella de la industria forestal (detalle en Fig 2)

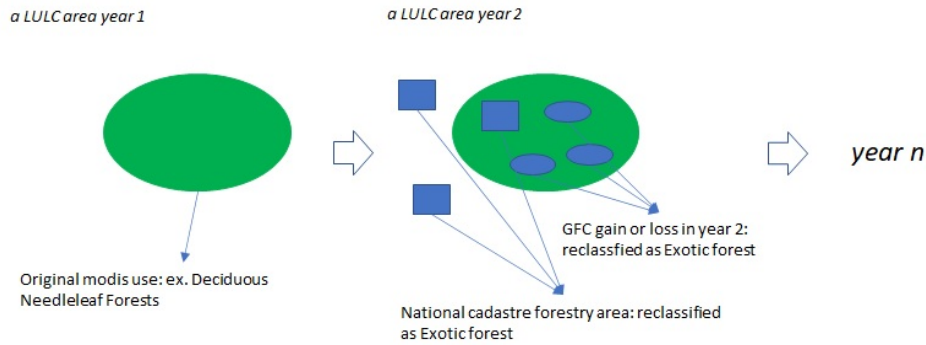


Figure 2: Adecuación uso forestal

Análisis estadístico preliminar

Se calculó la media de 18 años de cada uno de los modelos USLE (ton/ha) por uso de suelo y ecosistema mediante estadísticas zonales implementadas mediante la librería raster de R. Como ecosistemas se utilizaron las formaciones vegetacionales de (Luebert and Plischoff 2017). Se aplicó un análisis de varianza ANOVA anidado para buscar diferencias significativas entre los usos de suelo en dos de los ecosistemas de Chile central (Bosque esclerófilo versus matorral esclerófilo), considerando una prueba de posthoc de Tukey para poder identificar en donde estarían las diferencias significativas (para un resumen de la metodología revisar Fig 3).

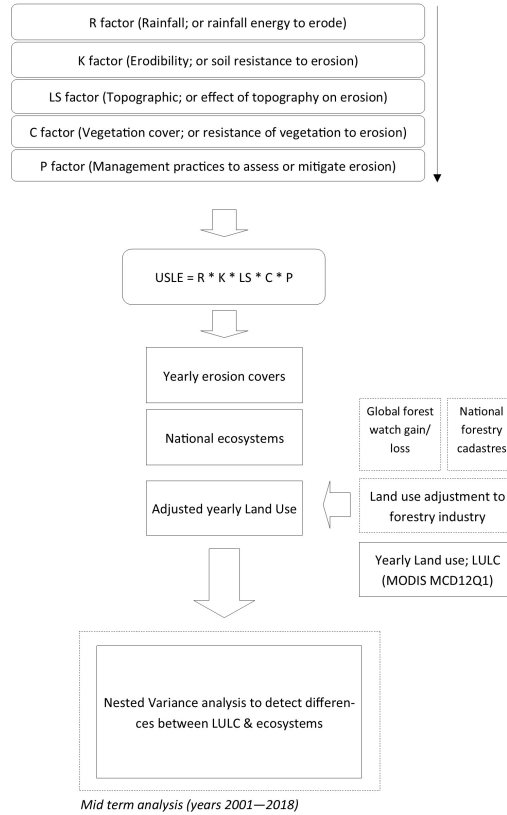


Figure 3: Resumen de la metodología

4 Resultados

4.1 Tasas de erosión por ecosistema

Se encontró que la tasa de erosión anual de ambos ecosistemas corresponde a 187984 ton/año, de las cuales el 91% corresponde al Bosque esclerofilo y el 9% al Matorral esclerofilo

Table 1: Perdida media anual por ecosistema

FORMACION	Erosión anual (ton/yr)
Bosque esclerofilo	171377.38
Matorral esclerofilo	16606.34

En adición, la tasa anual media de erosion del Bosque esclerofilo corresponde a 1.98 ton/ha/año y a 1.99 ton/ha/año para el Matorral esclerofilo (Valores netos en Tabla 1).

4.2 Análisis estadístico

Los resultados del ANOVA anidado encontraron diferencias entre ambos ecosistemas, siendo los bosques exóticos y las áreas cultivadas y de pastizales los usos de suelo con diferencias significativas entre ambos ecosistemas (véase Fig 4, Tabla 2 y Tabla 3).

Table 2: Erosión media por ecosistema y uso de suelo

FORMACION	USO	Erosión media
Bosque esclerofilo	Croplands / Grasslands	1.619588
Matorral esclerofilo	Croplands / Grasslands	1.959054
Bosque esclerofilo	Exotic forests	1.979087
Matorral esclerofilo	Exotic forests	1.042397

```
## `summarise()` regrouping output by 'FORMACION' (override with `.groups` argument)
```

Table 3: Relaciones significativas entre ecosistemas

USO_G1	FORMACION_G1	USO_G2	FORMACION_G2	p.adj	p.adj.signif
Exotic forests	Matorral esclerofilo	Exotic forests	Bosque esclerofilo	0.000000	****
Croplands / Grasslands	Bosque esclerofilo	Croplands / Grasslands	Matorral esclerofilo	0.000122	***

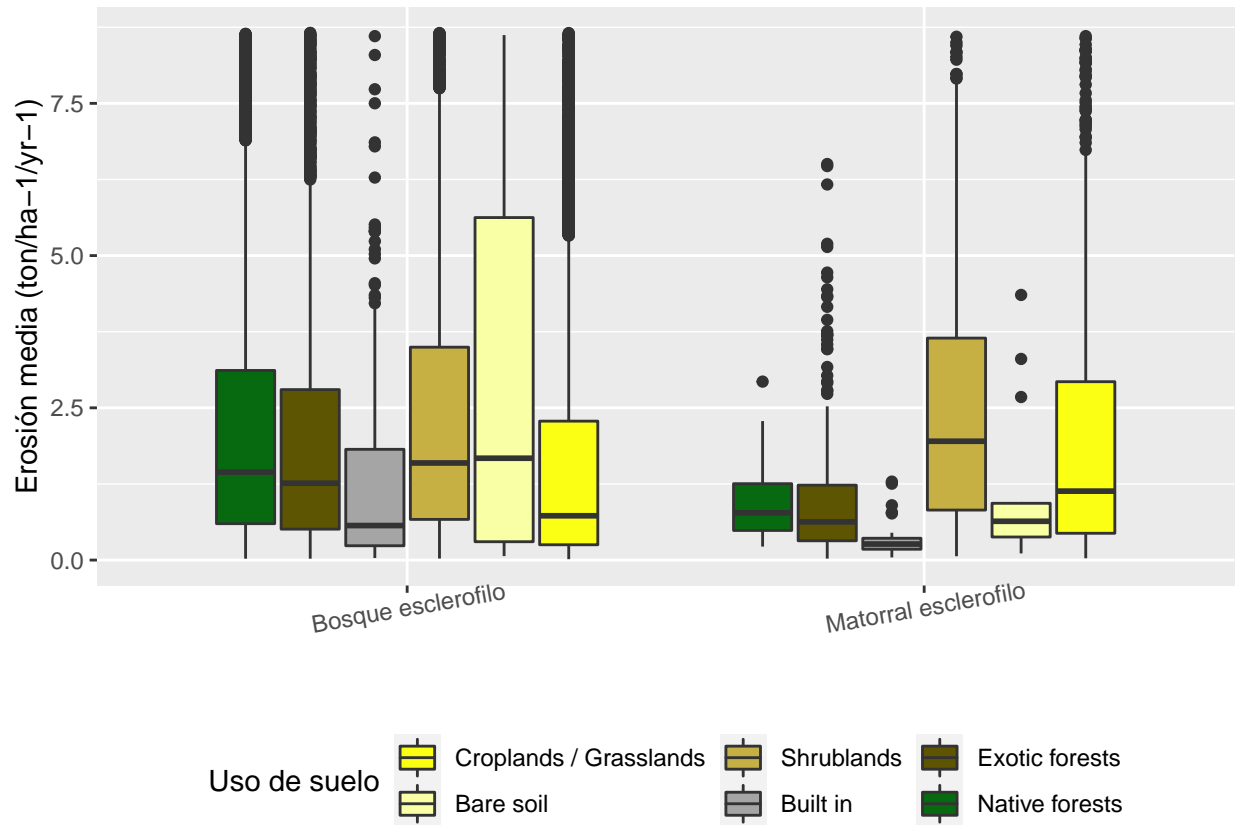


Figure 4: Boxplots entre usos de suelo por ecosistemas

5 Discusión/Conclusión

Se pudo determinar que si bien la tasa total anual de erosión del Bosque esclerófilo es mayor a la del Matorral esclerófilo, no hay mayores diferencias en las tasas medias anuales. Finalmente, ambas tasas se encuentran bajo la tasa media de erosión mundial, que corresponde a 2.8 Mg/ha^{-1} (Borrelli et al. 2017).

Por otro lado, se encontraron diferencias significativas entre las tasas medias anuales de ambos ecosistemas, destacando entre todos los usos las zonas cultivadas con pastizales y las plantaciones forestales, los cuales son a la vez los principales usos de suelo causantes de la erosión en el mundo.

Referencias

- Barahona-Segovia, Rodrigo M, Ignacio Nuñez-Hidalgo, Carlos González-Céspedes, and José Alejandro S Rojas-Osorio. 2019. "BEYOND the Past and Present: IDENTIFYING Current Trends of Conflicts with Biodiversity, Biological Conservation and Ecosystem Functions." *PERSPECTIVES AND CHALLENGES*, 33.
- Bonilla, Carlos A, and Karim L Vidal. 2011. "Rainfall Erosivity in Central Chile." *Journal of Hydrology* 410 (1-2): 126–33.
- Borrelli, Pasquale, David A Robinson, Larissa R Fleischer, Emanuele Lugato, Cristiano Ballabio, Christine Alewell, Katrin Meusburger, et al. 2017. "An Assessment of the Global Impact of 21st Century Land Use Change on Soil Erosion." *Nature Communications* 8 (1): 1–13.
- Borrelli, Pasquale, Kristof Van Oost, Katrin Meusburger, Christine Alewell, Emanuele Lugato, and Panos Panagos. 2018. "A Step Towards a Holistic Assessment of Soil Degradation in Europe: Coupling on-Site Erosion with Sediment Transfer and Carbon Fluxes." *Environmental Research* 161: 291–98.
- Desmet, PJJ, and Gerard Govers. 1996. "A Gis Procedure for Automatically Calculating the Usle Ls Factor on Topographically Complex Landscape Units." *Journal of Soil and Water Conservation* 51 (5): 427–33.
- Doran, John W. 2002. "Soil Health and Global Sustainability: Translating Science into Practice." *Agriculture, Ecosystems & Environment* 88 (2): 119–27.
- Doran, JW, and M Safley. 1997. "Defining and Assessing Soil Health and Sustainable Productivity." *Biological Indicators of Soil Health*. New York: CAB International.
- Durigon, VL, DF Carvalho, MAH Antunes, PTS Oliveira, and MM Fernandes. 2014. "NDVI Time Series for Monitoring Rusle Cover Management Factor in a Tropical Watershed." *International Journal of Remote Sensing* 35 (2): 441–53.
- Gorelick, Noel, Matt Hancher, Mike Dixon, Simon Ilyushchenko, David Thau, and Rebecca Moore. 2017. "Google Earth Engine: Planetary-Scale Geospatial Analysis for Everyone." *Remote Sensing of Environment* 202: 18–27.
- Hengl, Tomislav, Jorge Mendes de Jesus, Gerard BM Heuvelink, Maria Ruiperez Gonzalez, Milan Kilibarda, Aleksandar Blagotić, Wei Shangquan, et al. 2017. "SoilGrids250m: Global Gridded Soil Information Based on Machine Learning." *PLoS One* 12 (2): e0169748.
- Karger, Dirk Nikolaus, Olaf Conrad, Jürgen Böhrner, Tobias Kawohl, Holger Kreft, Rodrigo Wilber Soria-Auza, Niklaus E Zimmermann, H Peter Linder, and Michael Kessler. 2017. "Climatologies at High Resolution for the Earth's Land Surface Areas." *Scientific Data* 4: 170122.
- Karlen, Douglas L, and Charles W Rice. 2015. "Soil Degradation: Will Humankind Ever Learn?" Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- Keesstra, Saskia D, Johan Bouma, Jakob Wallinga, Pablo Titttonell, Pete Smith, Artemi Cerdà, Luca Montanarella, et al. 2016. "The Significance of Soils and Soil Science Towards Realization of the United Nations Sustainable Development Goals." *Soil*.

- Lagos, M, J Espinoza, and R Ortiz. 1994. "Erosión de Los Suelos En Chile." *Erosión Del Suelo En América Latina. Suelos Y Agua. FAO. Chile.*
- Luebert, F, and P Plischoff. 2017. "Sinopsis Bioclimática Y Vegetacional de Chile, 2 Edición. Editorial Universitaria." *Santiago.*
- Miranda, Alejandro, Adison Altamirano, Luis Cayuela, Antonio Lara, and Mauro González. 2017. "Native Forest Loss in the Chilean Biodiversity Hotspot: Revealing the Evidence." *Regional Environmental Change* 17 (1): 285–97.
- Montanarella, Luca. 2015. "Agricultural Policy: Govern Our Soils." *Nature* 528 (7580): 32–33.
- Montanarella, Luca, Mohamed Badraoui, Victor Chude, IDSB Costa, Tekalign Mamo, Martin Yemefack, MS AULANG, et al. 2015. "Status of the World's Soil Resources: Main Report." *Embrapa Solos-Livro Científico (ALICE).*
- Myers, Norman. 1984. "Gaia: An Atlas of Planet Management."
- Panagos, Panos, Pasquale Borrelli, Katrin Meusburger, Christine Alewell, Emanuele Lugato, and Luca Montanarella. 2015. "Estimating the Soil Erosion Cover-Management Factor at the European Scale." *Land Use Policy* 48: 38–50.
- Panagos, Panos, Pasquale Borrelli, Katrin Meusburger, Bofu Yu, Andreas Klik, Kyoung Jae Lim, Jae E Yang, et al. 2017. "Global Rainfall Erosivity Assessment Based on High-Temporal Resolution Rainfall Records." *Scientific Reports* 7 (1): 1–12.
- Parveen, Reshma, and Uday Kumar. 2012. "Integrated Approach of Universal Soil Loss Equation (Usle) and Geographical Information System (Gis) for Soil Loss Risk Assessment in Upper South Koel Basin, Jharkhand."
- Pimentel, David, Celia Harvey, Pradnja Resosudarmo, K Sinclair, D Kurz, M McNair, S Crist, et al. 1995. "Environmental and Economic Costs of Soil Erosion and Conservation Benefits." *Science* 267 (5201): 1117–23.
- Robinson, David A, Panos Panagos, Pasquale Borrelli, Arwyn Jones, Luca Montanarella, Andrew Tye, and Carl G Obst. 2017. "Soil Natural Capital in Europe; a Framework for State and Change Assessment." *Scientific Reports* 7 (1): 1–14.
- Sharpley, Andrew N, and Jimmy R Williams. 1990. "EPIC-Erosion/Productivity Impact Calculator. I: Model Documentation. II: User Manual." *Technical Bulletin-United States Department of Agriculture*, no. 1768.
- Wischmeier, Walter H, and Dwight David Smith. 1978. *Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning.* 537. Department of Agriculture, Science; Education Administration.
- Yang, Yuanyuan, Ruiying Zhao, Zhou Shi, Raphael A Viscarra Rossel, Dan Wan, and Zongzheng Liang. 2018. "Integrating Multi-Source Data to Improve Water Erosion Mapping in Tibet, China." *Catena* 169: 31–45.