

CARTOGRAFÍA DIGITAL DE SUELOS: UNA OPCIÓN PARA CHILE

DIGITAL SOIL MAPPING: AN OPTION FOR CHILE

Sr. Mauricio Calderón Sánchez¹

RESUMEN

La actual cartografía de suelos elaborada por CIREN, cubre una parte de las necesidades actuales del país relativas a suelos de aptitud agrícola y forestal; a escalas de detalle, sin embargo, hay una carencia de estudios de suelos y cartografía asociada relativa a ecosistemas tan particulares como los suelos del altiplano, suelos hídricos de humedales, suelos de alta montaña, suelos de regiones remotas y territorios insulares, tanto de detalle como de reconocimiento y cartografía temática. Se entiende que esto involucra un alto costo por actividades de terreno, no obstante, la cartografía digital de suelos es capaz de cubrir una serie de aspectos relativos a la extensión y distribución espacial de los suelos a modo de modelos predictivos para la creciente demanda en aspectos ecológicos y ambientales. A través del modelo SCORPAN se puede generar una cartografía que representa clases de suelos y propiedades temáticas. Las funciones de pedotransferencia permiten estimar variables no conocidas a través de propiedades conocidas del suelo, ajustándose a modelos de regresión. La captura de registros morfológicos de terreno junto a muestras de suelo que analizan propiedades físicas, químicas y biológicas permiten usar estos registros a modo de datos de entrenamiento para validar las funciones de transferencia.

Palabras claves: cartografía digital de suelos, modelos predictivos, modelos suelo-paisaje, variación espacial, sistemas de inferencia del suelo.

ABSTRACT

The current soil mapping produced by CIREN, covers a part of the current needs of the country related to soils of agricultural and forestry aptitude; at detail scales, however, there is a lack of soil studies and associated mapping related to such particular ecosystems as highland soils, wetland water soils, high mountain soils, soils of remote regions and island territories, both in detail and in thematic recognition and mapping. It is understood that this involves a high cost for field activities, however, digital soil mapping is able to cover a series of aspects related to the extension and spatial distribution of soils as predictive models for the growing demand in ecological and environmental aspects. Through the SCORPAN model, it is possible to generate a cartography that represents soil classes and thematic properties. Pedotransfer functions allow to estimate unknown variables through known soil properties, fitting to regression models. The capture of terrain morphological records together with soil samples that analyze physical, chemical and biological properties allow the use of these records as training data to validate the transfer functions.

Keywords: digital soil mapping, predictive models, soil-landscape models, spatial variation, soil inference systems.

¹ Soilsurvey Consultores, mauricio@soilsurvey.cl / cromoxeroll@gmail.com

INTRODUCCION

Actualmente la humanidad enfrenta múltiples desafíos relacionados con la seguridad alimentaria, el cambio climático, la degradación de tierras, la pérdida de biodiversidad, la disminución de los recursos hídricos y la sustentabilidad de ecosistemas. Esta problemática regional y global está estrechamente relacionada con las funciones del suelo como recurso natural y productivo, lo cual a su vez se relaciona con la producción de biomasa, protección ambiental, purificación del agua y mitigación del clima (Zhang, G.L., Feng, L. & Song Xhiao-dong, 2017). A nivel mundial, los mapas actuales de suelos generados por métodos convencionales de levantamiento de información en terreno, asociado a técnicas cartográficas estándares, son de escalas pequeñas, carentes de detalles e imprecisos en términos de definir límites entre unidades. Estos mapas tampoco reflejan la condición actual de los suelos y son incompatibles con bases de datos geoespaciales. Existe una brecha técnica debido a que los métodos convencionales de levantamiento de suelos llevan trabajo, consumen tiempo y son de alto costo. Por tanto, el avance de la computación y las tecnologías geoinformáticas, han generado un gran potencial para mejorar la información cartográfica de suelos tradicional. La situación en Chile, no es diferente y agrega otros problemas asociados a la falta de cartografía extensiva, especialmente, en muchos suelos de aptitud forestal de precordillera y cordillera de la costa, cuencas del altiplano y espacios naturales de alta montaña, archipiélagos, islotes y fiordos de la zona austral, humedales magallánicos y selvas y bosques de la región de Aysén. Lo anterior, dado que la cartografía exploratoria está asociada a cuencas agropecuarias de naturaleza productiva y dejando de lado aspectos de biodiversidad y conservación de recursos naturales (Figura N° 1). Los estudios de suelos en Chile son formalmente elaborados por el Centro de Información de Recursos Naturales – CIREN del Ministerio de Agricultura, abarcando principalmente cuencas agropecuarias de las principales regiones del país. Se trata de estudios de gran calidad técnica, dado que tienen su origen en el proyecto aerofotogramétrico Chile-OEA-BID realizado entre los años 1961-1964, con coordinación de la Organización de Estados Americanos y recursos económicos otorgados por el Banco Interamericano de Desarrollo y orientados

a apoyar políticas de planificación y proyectos de desarrollo económico.

Este proyecto realizó descripciones de suelos detallando sus características, entregando antecedentes de un perfil modal a base de propiedades morfológicas (color, manchas, estructura, meteorización, profundidad); físicas (textura, densidad, humedad), químicas (ph, conductividad eléctrica, saturación de bases) y biológicas (materia orgánica, carbono orgánico) del suelo, junto a una clasificación taxonómica (Aridisoles, Vertisoles, Histosoles) asociada a la serie de suelos que es la expresión espacial que adquiere la cartografía de suelos entregada en una ortofoto a escala 1:20.000 en formato papel y cartografía digital a color u ortoimagen con escala de salida de 1:10.000, generadas a partir de imágenes satelitales (CIREN, 2020). Esta información ha sido sometida a varias actualizaciones en sus propiedades edafológicas fundamentales y corrección de límites y reagrupamiento de series y fases, con apoyo de especialistas del Departamento de Ingeniería y Suelos de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Chile, a través de proyectos específicos y tesis de titulación profesional, fundamentalmente restituciones de escalas de detalle (1:20.000), a escalas de reconocimiento (1:100.000), y a escalas generalizadas (1:250.000 y 1:500.000), de algunas regiones del país. A pesar de ello la información actualmente disponible en términos de cartografía de suelos que entrega CIREN, no es suficiente para cubrir las necesidades productivas y ambientales del país.

En efecto y dado que los estudios de suelos actuales tienen un sesgo agropecuario, no se incorporan aspectos y propiedades inherentes a suelos forestales, como las características y naturaleza del material parental, propiedades hidrofísicas como la conductividad hidráulica para estudios de riego y drenaje, concentraciones de carbono para estudios ecológicos y de cambio climático, o bien el concepto de suelos de humedales (wetland soils) que plantea el desafío de trabajar con suelos hídricos y toda la gama de conceptos técnicos y funciones asociadas a ellos. Según Luzio y Alcayaga, (1990), gran parte de los suelos del extremo austral solo están identificados a nivel de órdenes de suelos, a escalas muy pequeñas, sin información de detalle que es la necesaria para proyectos productivos o de

conservación. Muchos suelos de turberas (peatland soils) de las regiones de Aysén y Magallanes simplemente no presentan características a nivel

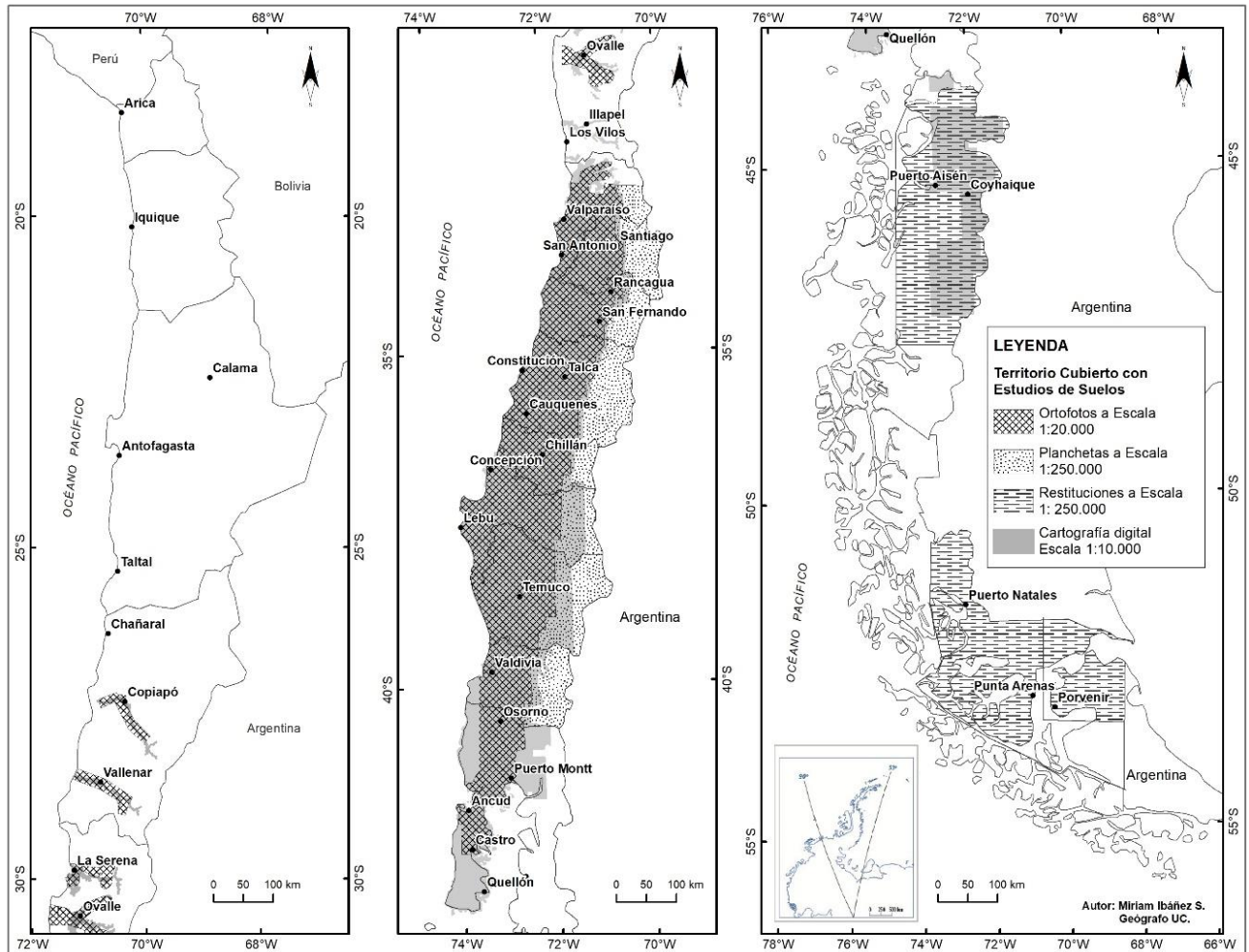


Figura N° 1. Cobertura nacional de estudios agrológicos en Chile.
Fuente: CORFO, (1973); CIREN, (2020); INIA, (2014).

de serie de suelos que es la unidad cartográfica (y taxonómica) de mayor detalle de información

Otro problema asociado a la cartografía de suelos tiene que ver con la escala de representación de la información, al existir mapas de pequeña escala por ejemplo para representar la erosión hídrica, donde se identifica la pérdida de suelos a nivel regional o provincial, necesarios para para situaciones de focalización de recursos o estudios de investigación pero inadecuados para programar o ejecutar proyectos de conservación de suelos a escala predial, donde se requiere un nivel de detalle mayor.

Se ha avanzado mucho en aspectos de tecnología geomática y percepción remota utilizando imágenes satelitales del tipo Quickbird II, SpotMaps y actualmente Spot 6/7; como así mismo en resoluciones espaciales de 2.5 mt, 1.5 mt y hasta 0.60 mts, pero se ha descuidado la incorporación de registros de terreno relativo a calicatas con propiedades morfológicas y fisicoquímicas del suelo, justamente por su alto costo y mayor tiempo de elaboración de productos finales, fuera de las cuencas agrícolas ya evaluadas por CIREN, lo cual deja al descubierto una gran superficie del territorio nacional que no cuenta con cartografía de suelos

en forma regular y continua desde el punto de vista espacial. Solo registros esporádicos en cada región y de acuerdo a estudios de naturaleza específica.

Las delineaciones de suelos elaboradas a través del método tradicional a escala 1: 20.000 han resultado ser de gran calidad y precisión para los objetivos que fueron planteados, pero también se requieren levantamientos de suelos a escalas detalladas (1:10.000) y muy detalladas (<1:5.000) para planificación predial y otras escalas de mediana a baja intensidad de prospección (1:100.000 o 1:250.000); sobre todo si ya existe un mapa elaborado por Luzio, W., y S. Alcayaga, (1992), a escala 1:6.000.000, que da cuenta de los órdenes de suelos existentes en el país, de acuerdo a la taxonomía de suelos de los Estados Unidos lo cual acota en alguna medida grandes aspectos de los suelos a prospectar, dado que la variabilidad del suelo es alta y los objetivos son múltiples. También es necesario actualizar en forma regular la información sobre todo aquellas propiedades que provienen de terreno como la textura, pedregosidad, pH, conductividad eléctrica, etc. y que están sujetas a cambios temporales. Actualmente existe una demanda creciente por información de suelos de naturaleza espacial para cubrir necesidades de planificación ambiental, modelos predictivos y decisiones económicas de naturaleza productiva, dado que existe una fuerte presión por el uso del suelo desde múltiples sectores de la economía a nivel mundial: agricultura, silvicultura, ingeniería, urbanismo, áreas protegidas, minería y energía (Nussbaum, M., Ettlin, L., Coltekin, A., Suter, B. and E. Markus, 2011).

El 3 de junio del año 2019, la comisión de agricultura del senado liderada por los senadores Carmen Gloria Aravena (UDI) y Alvaro Elizalde (PS) se comprometieron a aprobar una Ley General de Suelos para Chile (SCHCS, 2020), orientada a normar y regular el uso, manejo y conservación del suelo en sus diversos ámbitos de interés a fin de evitar su degradación. El mismo año, el Departamento de Ingeniería y Suelos de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Chile, organizó el Whorkshop en Digital Soil Mapping y Global SoilMap, a fin de establecer los principales avances en el manejo de la información digital aplicada a cartografía de suelos (UCH, 2020).

Surge entonces la Cartografía Digital de Suelos (CDS) o mapeo digital de suelos cuyo nombre proviene del término homónimo en inglés Digital Soil Mapping (DSM), que hace referencia a la creación y población de sistemas de información espacial para suelos a través de modelos numéricos que son capaces de inferir la variación temporal y espacial que presentan los tipos y propiedades del suelo, a partir de su conocimiento, observación y propiedades relacionadas (Lagacherie, P., Mc Bratney, A.B., 2007; Hartemik, A., Mc Bratney, A. & M. L. Mendoça-Santos, 2008). Se trata de cartografía automatizada generada por ordenadores utilizando análisis de clasificación y modelos de regresión para datos espaciales, redes neuronales, simulaciones de Markov, simulaciones geoestadísticas etc. que permiten predecir las características del suelo basado en factores del clima y el terreno, a pesar que éstas técnicas son menos precisas que la cartografía tradicional de suelos (UWE²), 2010; citado por Nussbaum, M., Ettlin, L., Coltekin, A., Suter, B. and E. Markus, 2011). Entonces para establecer la precisión de los modelos digitales es necesario compararlos con la cartografía de suelos proveniente de levantamientos de terreno que se consideran la *verdad fundamental* (ground truth), a la escala correspondiente. Es más autores como Juan José Ibáñez, (2019) señalan que la edafología de salón y ordenador jamás pueden sustituir a la edafología de campo. Las escalas de los mapas de trabajo inducen una serie de características y decisiones que deben considerarse tanto en terreno como en gabinete, relativas al tipo de muestreo, frecuencia e intervalos de muestreo y posibles interpolaciones entre los datos.

La presente investigación se efectúa con el objeto de suministrar los fundamentos científicos y componentes técnicos de la cartografía digital de suelos (digital soil mapping) como herramienta complementaria en la elaboración de cartografía de suelos, a nivel nacional a fin de cubrir los territorios que actualmente no presentan estudios de suelos a diferentes escalas de reconocimiento. Paralelamente éste desafío requiere contar con bases de datos de propiedades específicas del suelo, capaces de servir para alimentar modelos predictivos y cartografía temática de suelos, que actualmente no existen.

² UWE: Umwelt und Energie. Revista de Medio Ambiente y Energía. Alemania

CARTOGRAFIA DIGITAL DE SUELOS: CONCEPTO

Con la explosión de las tecnologías informáticas y tecnologías espaciales aparecen una serie de datos y registros en diversos campos del conocimiento que es necesario almacenar y manejar. La ciencia del suelo no ha estado ajena a estos problemas sobre todo en países desarrollados como Estados Unidos, Alemania y Australia, donde el recurso suelo cuenta con registros abundantes y permanentes de sus propiedades. Paralelamente el almacenaje de los datos requiere programas estadísticos con base territorial lo cual lleva al desarrollo de la geostatística, los sistemas de información geográfica (SIG), el uso de GPS, sensores remotos y fuentes de datos espaciales integrados como los modelos digitales de elevación (DEM). Entonces la gran inquietud de la comunidad científica fue integrar las antiguas metodologías de evaluación de suelos, fundadas en observación de calicatas y análisis de laboratorio con estas nuevas herramientas de análisis espacial emergentes.

La cartografía digital de suelos (CDS) es entonces la expresión espacial a través de un producto georeferenciado (mapa u ortofoto), de las propiedades del suelo, inicialmente almacenadas en bases de datos y que poseen relaciones cuantitativas entre la expresión espacial de naturaleza ambiental y las mediciones hechas en terreno y laboratorio (Mc Bratney et al., 2003). También es posible definirla como la predicción espacial de las clases o propiedades del suelo, a partir de datos puntuales trabajados con algoritmos estadísticos. A diferencia de la cartografía tradicional de suelos, la cartografía digital representa la variación del suelo a través del paisaje que conforma, dado que rescata la variabilidad que presentan en el espacio los factores de formación de suelos, que son la piedra angular de la génesis del pedón o unidad mínima diferenciable. En 1941, Hans Jenny establece un modelo mecanicístico o mecanístico que interpreta la formación y desarrollo de un suelo. Un modelo mecanístico asume que un sistema complejo puede comprenderse examinando el funcionamiento de sus partes y la manera en que se juntan. En efecto Jenny señaló que la formación de un suelo dependía de cinco factores: clima, material parental, relieve, organismos y tiempo; expresados

por la Ecuación de Jenny o Ecuación de los Factores de Formación de Suelos (Ecuación N° 1).

Ecuación N° 1

$$S = f(c, m, r, o, t)$$

donde:

S = formación del suelo

c = clima

m = material parental

r = relieve

o = organismos (vegetales, animales, hombre).

t = tiempo

Se trata más bien de una función (f) de relaciones más que de una expresión matemática con soluciones concretas. Esta expresión cualitativa tiene validez para la comunidad de científicos de suelo en todo el mundo y los ha motivado a buscar una expresión cuantitativa a fin de establecer funciones algorítmicas entre pares de variables, manteniendo el resto de los factores constantes. Si la variable es el clima (manteniendo el resto de los factores constantes), entonces el suelo que se forma depende directamente de los parámetros del clima como la precipitación, las temperaturas, radiación solar, humedad relativa, etc. Esta relación se conoce como climofunción que al manifestarse en un transecto de terreno se pasa a llamar climosecuencia.

Si la variable son los organismos (que tienen vida), la función se denomina organofunción o biofunción donde la vegetación juega el rol más importante en la formación del suelo. La organosecuencia es la variación del suelo por causa de la vegetación en un recorrido o transecta. Últimamente se ha establecido una nueva relación: la antropofunción donde el hombre ha jugado un rol importante en aspectos de calidad y degradación de suelos. El efecto del relieve en las características del suelo se conoce como topofunción y su expresión espacial en un transecto es una toposecuencia. El drenaje es una característica del suelo regulada por el relieve.

A su vez el material parental conforma una litofunción a lo largo de una litosecuencia y el tiempo define una cronofunción, encontrándose efectos no muy claros del material parental en la formación de suelos al establecer una cronosecuencia. Algunos autores piensan que ésta

variable sería el único factor realmente independiente en la formación de suelos (Mc Bratney et al., 2003). Reconocer las interacciones entre los factores de formación de suelos permite identificar patrones de comportamiento observables a simple vista para registrarlos en una cartografía.

COVARIACIONES AMBIENTALES

En estadística se define covarianza como el valor que define la variación conjunta que existe entre dos variables aleatorias respecto a sus medias. Es un dato que permite determinar si existe dependencia entre ambas variables. (J.C., Watkins, 2016). En geoestadística se define como la fuerza de interacción entre dos variables de un campo espacial aleatorio, y por lo tanto juega un rol importante en el campo de la predicción de estimadores (Le, N.D., and J.V. Zidek, 2006). En Cartografía Digital de Suelos, las covariaciones ambientales, son los factores de formación de suelos, que tienen expresión espacial y son capaces de incidir en la formación de una clase de suelo cuando los otros cuatro factores son constantes, y por tanto la formación del suelo tiene una relación unidimensional con la variable independiente.

La mayoría de las covariaciones ambientales utilizadas en cartografía digital de suelos, son modelos de registros continuos de datos, haciendo más realista la expresión espacial de la información que los modelos de registros discretos. Esta continuidad permite eliminar las desventajas de clases de suelos prefijadas y límites abruptos entre polígonos en una cartografía. En la práctica la continuidad depende del tamaño de la celda (o pixel) y del grado de precisión establecido para el registro de los datos (Soil Science Division Staff, 2017).

Por tanto para un proyecto concreto de cartografía digital el suelo puede ser representado por covariables derivadas de: 1) puntos georeferenciados de terreno o bien mediciones de laboratorio, 2) registros espectrales mediante sensores remotos o bien 3) mapas actuales de suelo. Entre los registros digitales es posible considerar información de clase taxonómica del suelo, profundidad a la roca madre, o bien propiedades físicas o químicas de los horizontes genéticos del suelo. Las propiedades de la superficie del suelo pueden tener firmas espectrales distinguibles mediante sensores

remotos, como por ejemplo el color o bien acumulaciones de yeso. A su vez la covariable organismos puede ser representada por los registros de la vegetación o bien de cobertura vegetal capturada a través de la información del NDVI.

La presencia de zonas con badlands, donde el suelo está descubierto de vegetación es posible identificarla con el vigor de la vegetación. La información relativa al material parental puede obtenerse de mapas geológicos o bien de registros espectrográficos de rayos gama, factibles de obtener con radioespectrómetros-gama, o bien registros espectrales obtenidos por sensores remotos, que capturan la respuesta electromagnética de los diferentes minerales que componen las rocas y sedimentos constitutivos del material parental. El relieve puede ser evaluado a través de atributos de terreno como longitud de pendiente, pendiente, curvatura de pendiente, exposición de pendiente, altitud, formas del relieve o bien índices de humedad como medidas indirectas. El clima se puede obtener a partir de mapas de clima y más localmente a través de registros indirectos de altitud (variaciones de temperatura y precipitación) o bien modelos de radiación solar que describen adecuadamente ésta covariable. Finalmente, el tiempo es una covariable compleja de exponer, y por tanto no se considera habitualmente en los modelos de cartografía digital, sin embargo, las alteraciones antrópicas del paisaje como la desertificación, o la contaminación de las napas subterráneas, o la salinización de suelos mediante el riego podrían ser adecuados predictores asociados a factores temporales (Soil Science Division Staff, 2017).

EL MODELO SCORPAN

El modelo SCORPAN, planteado por Mc Britney et al., (2003) es una representación espacial de la relación suelo-paisaje, a modo de modelo predictivo de la condición actual del suelo y fundamentado en los factores de formación de suelos de Jenny (1941) y Dokushaev (1883), (Malone, B., 2011). Se trata de un modelo nemotécnico para predecir atributos del suelo (S), clima (C), los organismos (O), el relieve (R), el material parental (P), la edad o tiempo del ecosistema (A) y la distribución de éstas covariables en el espacio (N), de código SCORPAN. Corresponde a la ecuación N°2.

Ecuación N° 2

$$S = f(S, C, O, R, P, A, N) + \varepsilon$$

o bien

$$S = f(Q) + \varepsilon$$

siendo ε , una estimación de errores o incertezas o bien residuos espaciales que varían localmente y Q la función empírica cuantitativa que modela el recurso suelos (S), a través de los factores de formación, establecidos como atributos. La expresión espacial de este conjunto de datos trabajados en ordenador se sintetiza en un modelo de elevación digital, donde los puntos de la malla o superficie de datos que se despliegan se estiman a través de un método de interpolación geostatístico o krigin, que asigna ponderadores a los puntos de la malla y que utiliza una herramienta de análisis de vecindad de puntos cercanos, llamada variograma. La clave de esta metodología radica en elegir para cada proyecto particular los atributos más incidentes en la formación de la clase de suelos y sus respectivos ponderadores. (*Soil Science Division Staff, 2017*).

FUNCIONES PEDOMETRICAS O FUNCIONES DE PEDOTRANSFERENCIA

La pedometría es una ciencia aplicada (pedón=suelo; métrica=medición) interdisciplinaria que utiliza las matemáticas, los métodos estadísticos, la geomática y la ciencia del suelo para el estudio de la génesis y distribución de los suelos. También se traduce como edafometría o edafología matemática (IUSS, (2020).

Entre los aspectos y tópicos que aborda la pedometría es posible mencionar el análisis y modelación espacial, incluida las variaciones temporales de las propiedades del suelo, la propagación de errores, la integración de datos multiescalares, el uso de transformadas de ondinas (wavelet transforms) en análisis de variaciones complejas, la modelación de la relación suelo-paisaje utilizando análisis digital de terreno, el uso de algoritmos cuantitativos de clasificación de suelos, simulación de génesis de suelos, criterios de evaluación y cuantificación de incertezas, análisis de patrones de distribución de suelos, evaluación y diseño de estrategias de muestreo, uso de información en interpolación espacial y aspectos diversos de agricultura de precisión (IUSS, (2020).

Sin embargo, el aporte fundamental de la pedometría a la cartografía digital de suelos se orienta en definir las incertezas existentes en la distribución espacial de estratas, horizontes y tipos de suelos, capturando el límite difuso que existe entre una unidad cartográfica de suelos y otra; y expresándolo espacialmente como una transición gradual y no como una línea sólida propia de una cartografía tradicional. Otro aspecto importante de la pedometría es modelar a través de las funciones de pedotransferencia (pedotransfer functions) los patrones de distribución espacial de propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo; capaces de ser cartografiadas espacialmente con indicación de rango de aparición.

Una función de pedotransferencia es una ecuación o bien un algoritmo, que expresa una relación matemática entre diferentes propiedades del suelo (Pachepsky, Y. and M. Th. van Genuchten, 2011), a fin de estimar o evaluar aquella variable que es costosa de medir, a partir de registros disponibles que presentan una relación de alta confianza con la variable incógnita. Son modelos predictivos (Coronado, J.G. y H.M. González, 2009).

Un ejemplo clásico de funciones de transferencia ha sido la estimación del punto de marchitez permanente del suelo–PMP, a partir de la textura (Wikipedia, 2020), utilizando técnicas de análisis de regresión estadística, para relaciones lineales y no-lineales (Ecuación N° 3).

Ecuación N° 3

$$PMP (\%) = 0.01 (arena (\%)) + 0.12(limo(\%)) + 0.57(arcilla(\%))$$

Por tal motivo es posible establecer relaciones entre predictores y estimadores para otras propiedades del suelo, generalizando la relación se tiene, Ecuación N° 4.

Ecuación N° 4

$$p = a(arena(\%)) + b(limo(\%)) + c(densidad) + \dots + x(VarX)$$

siendo p la propiedad del suelo a ser estimada, a,b,c y x, coeficientes de regresión y VarX cualquier propiedad del suelo fácil de medir, que constituye el predictor.

Tabla N° 1. Ejemplos de funciones de pedotransferencia, para estimar propiedades del suelo de naturaleza fisicoquímica.

Función de transferencia (*)	Fuente
$K_{sat} = 2319,055(\varphi_e)^{3,66}$	Minasny & McBratnet,(2000)
$K_{sat} = 0.1(-4.994 + 0.56728(\text{arena} (\%)) - 0.131(\text{arcilla}(\%)) - 0.0127 (\text{CMO}))$	Julia et al.(2004).
$D_a = 1.524 - 0.0038 (\text{arcilla} (\%)) - 0.050 (\text{CCO}(\%)) - 0.045 (\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}) + 0,001 (\text{arena}(\%))$	Bernoux et al., (1998)
$\text{CE} = 0.401[\text{Na}^+] + 0.213 [\text{Cl}^-] + 0.468$	Rahimi et al. (2009)
$\text{CIC} = 2.03(\text{CCO}(\%)) + 0.109(\text{arcilla} (\%)) + 12.66$	Rahimi et al. (2009)
$\text{PSI} = 0.917(\text{RAS}) + 0.224$	Rahimi et al. (2009)
Mineralización de N = $3.45(\text{CMO}(\%)) + 1.12(\text{arcilla}(\%)) - 2.2(\text{CIC}) - 8.4$	Aguilar et. Al., (2015)
$\text{CC} = 0.2576 - 0.0020(\text{arena}(\%)) + 0.0036(\text{arcilla}(\%)) + 0.0299(\text{CMO}(\%))$	Delgado y Barreto, (1988)
$\text{PMP} = 16.55 - 0.174(\text{arena}(\%)) - 0.164(\text{limo}(\%)) + 0.154(\text{arcilla}(\%)) + 1.24(\text{CMO}(\%))$	Delgado y Barreto, (1988)
$\text{COS} = e \cdot D_a \cdot (C_t - C_{\min}) \cdot (1 - P (\%)/100)$	FAO, (2017)

(*): φ_e =porosidad efectiva; CMO (%)=contenido de materia orgánica; CCO(%)=contenido de carbono orgánico del suelo; arena(%)= porcentaje de arena; arcilla(%)= porcentaje de arcilla; $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ =potencial de iones hidrógeno, evaluado en agua; $[\text{Na}^+]$ = concentración de iones sodio; $[\text{Cl}^-]$ = concentración de iones cloro; RAS= razón de adsorción de sodio (adimensional); PSI = porcentaje de sodio intercambiable (%); CIC = capacidad de intercambio catiónico(cmolc/kg suelo); CC = capacidad de campo(%); PMP=punto de marchitez permanente(%). Mineralización de Nitrógeno en (mg kg^{-1}); COS= reservas de carbono orgánico del suelo (kg/m^2); e = espesor del hirozonte (m); D_a = densidad aparente del suelo (kg/m^3); C_t = contenido total de carbono (grC/gr suelo); C_{\min} = contenido de carbono mineral (grC/gr suelo); p = porcentaje de predegradación interna del suelo (%). Fuente: Abdelbaky, et al., (2009); da Silva Gomez, A., de Souza Ferreira, A.C., Machado Pinheiro, E.F., Duarte de Menezes, M., and M. Bacis Ceddia, (2017); Hadi Rahimi Lake, Ali Akbarzadeh and Ruhollah Taghizadeh Mehrjardi, (2009). Hadi Rahimi Lake, Ali Akbarzadeh and Ruhollah Taghizadeh Mehrjardi, (2009); Reyes, E., (2018); Aguilar-Duarte, Y; Cano-González, A; Ramírez-Silva, J; y Bautista-Zúñiga, F., (2015); Pineda, C. y J. Vilorio, (1997); FAO, (2017).

La Tabla N° 1, identifica ejemplos de funciones de transferencia para diferentes propiedades utilizadas en la ciencia del suelo. Cada ecuación estimada debe ser validada con registros de terreno, estableciéndose las condiciones de borde para predictores y estimadores, incluso asociándolas muchas veces a formaciones edafositémicas particulares a través de la taxonomía de suelos, dado que se trata de modelos predictivos de naturaleza empírica y no física, de modo que en general no tienen una representatividad universal.

Desde el punto de vista espacial la determinación del contenido de humedad de una formación vegetal (VWC, vegetation water content) también constituye una función de transferencia, a modo de estimador y que utiliza predictores

entregados por los sensores de imágenes satelitales, Ecuación N° 5.

Ecuación N° 5

$$VWC = (1.9134 \times NDVI^2 - 0.3215 \times NDVI) + f(NDVI_{max} - NDVI_{min}) / (1 - NDVI_{min})$$

donde el NDVI es el índice normalizado de vigor de la vegetación y f un factor de corrección apical que corresponde al máximo contenido de agua que presentan los ápices de la vegetación en pie, variable que debe medirse en terreno para ajustar el modelo. Diferentes formaciones vegetacionales tienen valores propios de f y cuando es superior a 20 unidades, tiene un fuerte impacto en la estimación de VWC (Van Looy, K., Bouma, J., Herbst, M., Koestel, J., Minasny, B., Mishra, U., Vereecken, H.,2017).

BANDAS ESPECTRALES UTILIZADAS EN MAPEO DIGITAL DE SUELOS

Las bandas espectrales generadas por los sensores del satélite, deben ser transformadas en registros útiles para que funcionen como firmas espectrales, a partir del uso de algoritmos que convierten la información de reflectancia o registros numéricos de bandas en índices asociados a las propiedades del suelo que se requieren simular. Se trata de combinar 2 o 3 bandas en un solo índice numérico. Estos derivados de datos espectrales son índices importantes de acuerdo a múltiples propósitos: a) índices de propiedades biofísicas, relacionadas con covariables ambientales del modelo SCORPAN, b) reducción del volumen de datos, mediante la construcción de nuevas bandas integradas y c) reducción de la iluminación topográficamente variable, dado que estos registros son considerados ruido más que información relevante. Las transformaciones más importantes son las relacionadas con las propiedades biofísicas, donde la abundancia de vegetación es crucial debido a que esta componente presenta patrones de reflectancia específicos. Sin embargo, otras propiedades del suelo como el contenido de humedad o la presencia de minerales pueden generar patrones de reflectancia particulares, medibles y representativos de procesos o propiedades pedogenéticas (Figura N° 3).

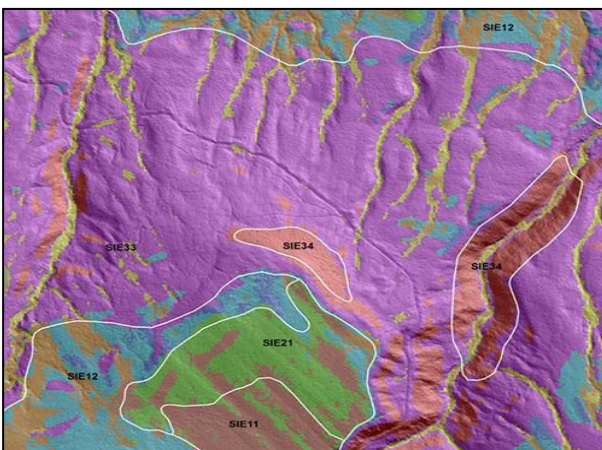


Figura N°3. Cartografía digital de suelos del territorio identificando límites graduales entre unidades cartográficas. Fuente: NRCS, (2020).

ETAPAS Y PROCESOS DE UNA CARTOGRAFIA DIGITAL

En cada proyecto de Cartografía Digital de Suelos las etapas y procesos necesarios a seguir son actividades invariables, que no cambian a través del tiempo, ni depende del tipo de proyecto a ejecutar. La Tabla N° 3, esquematiza las etapas a seguir, en forma ordenada para alcanzar resultados promisorios, (Figura N° 4).

BASE DE DATOS DE PERFILES DE SUELOS

Para la modelación y uso de las funciones de transferencia es necesario contar con una base de datos de terreno, o sistema de información de suelos, debidamente georeferenciada; organizada y planificada para ello. Estos datos deben estar asociados e íntimamente ligados a las condiciones morfológicas, geomorfológicas, ecológicas, climáticas y ambientales del terreno donde se encuentran, para generar conclusiones coherentes en los modelos que se elaboran a partir de ellos. No pueden ser registros aislados. Muchas de estas bases de datos son de carácter nacional, como las proporcionadas por el Servicio de Conservación de Recursos Naturales de los Estados Unidos, con más de 20.000 perfiles de suelos (Nachtergaele, F.O., 2000).

CONCLUSIONES

La actual disponibilidad de cartografía de suelos generada a nivel nacional, requiere diversificar las escalas de representación de la información espacial, fundamentalmente hacia escalas de reconocimiento e incluso nivel exploratorio, a fin de abarcar nuevos territorios que actualmente no tienen cartografía extensiva y continua de suelos, como el altiplano chileno, fiordos y humedales de la zona austral entre otros.

Surge una nueva opción que es la Cartografía Digital de Suelos (CDS), a través del uso de herramientas de percepción remota, apoyadas por programas geomáticos específicos para levantar información espacial a modo de modelos predictivos, sin abandonar la captura de información de terreno, que es el "cable a tierra" de la ciencia del suelo, a través de las funciones de

pedotransferencia que son sistemas de inferencia de las propiedades básicas del suelo, establecidas a través de análisis de regresión entre las técnicas más comunes.

El gran aporte de la cartografía digital, a la ciencia del suelo se refiere a la representación de unidades

Tabla N° 3. Etapas y procesos necesarios para ejecutar un proyecto de cartografía digital de suelos. Fuente: *Soil Science Division Staff, (2017)*.

Etapas	Procesos
Definir los objetivos y área del proyecto	a. Clases de Suelos b. Propiedades del Suelo
Identificar atributos físicos de interés	a. Covariaciones del modelo SCORPAN b. Escala de los procesos c. Mediciones a realizar d. Datos disponibles (terreno-sensores remotos)
Fuente y procesamiento de la información	a. Identificar y recoger datos b. Evaluar la calidad de los datos c. Organizar los datos d. Procesar los datos
Exploración de los datos y análisis de las formaciones geomorfológicas	a. b. Selección apropiada de predictores
Muestreo de los datos de entrenamiento	a. Estudios de casos y cartografía previa b. Muestras directas de terreno c. Evaluación de la idoneidad predictiva de la covarianza d. Evaluación de la idoneidad predictiva de los datos
Predicción de las clases o propiedades del suelo	a. Elegir métodos predictivos apropiados b. Predicción supervisada/no-supervisada para clases de suelo c. Modelos geoestadísticos para propiedades del suelo
Calcular la precisión e incerteza de los resultados	a. Error o precisión aceptable b. Volver a revisar metodología, predictores y datos de entrenamiento
Ejecutar la cartografía digital de suelos	a. Producción de cartografía de clases de suelo b. Producción de cartografía de propiedades del suelo c. Comparar con cartografía pre-existente d. Crear productos de información de suelos e. Aplicar la cartografía a otras disciplinas

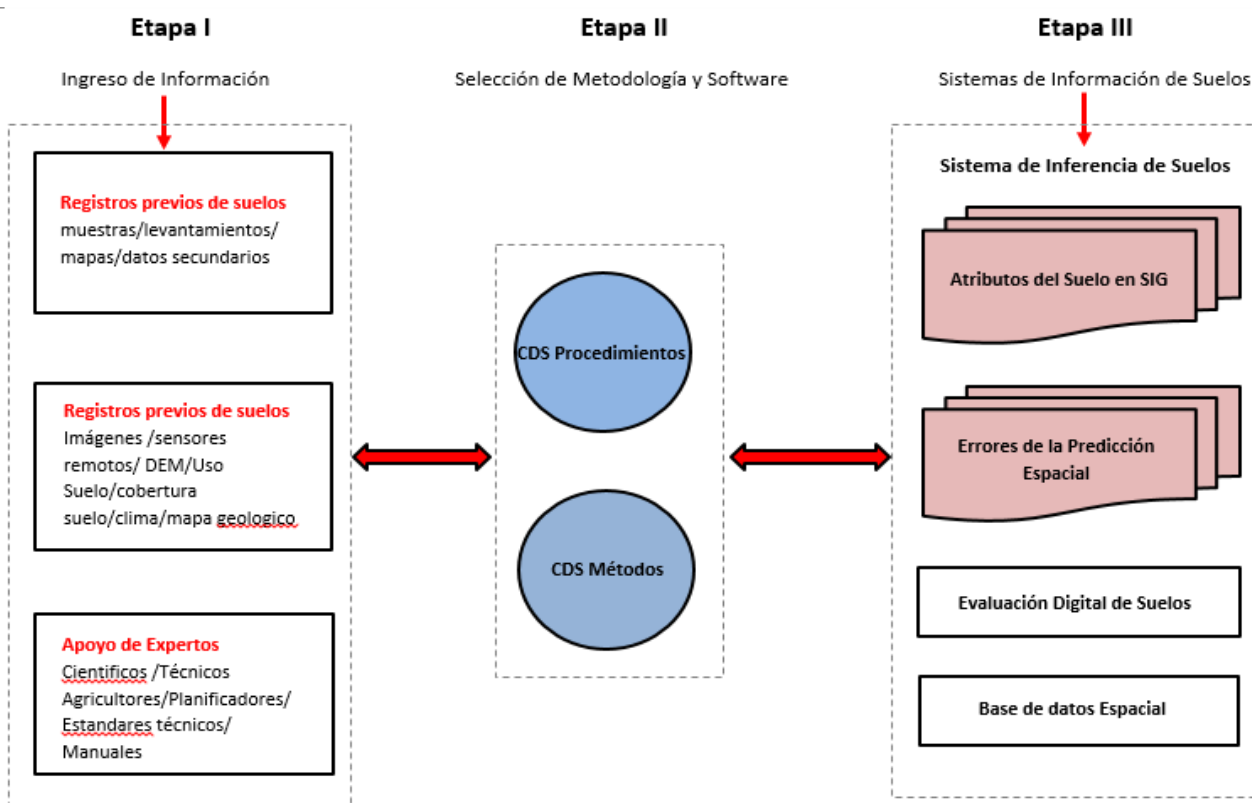


Figura N° 4. Diagrama de flujo que muestra las etapas de la Cartografía Digital de Suelos-CDS
Fuente : Nachtergaele, F.O., (2000).

cartográficas de límites difusos, identificando la gradualidad propia de los factores de formación como el clima, la vegetación, el relieve y el material parental entre los más incidentes en la formación del suelo.

Esta medida apunta a capturar la variabilidad espacial y temporal de los suelos como la fertilidad y disponibilidad de nutrientes, textura, contenido de humedad, etc. a fin de establecer medidas de manejo ajustadas a la naturaleza intrínseca de los recursos productivos. El aporte de la percepción remota ha sido fundamental a través de la creación de indicadores que transforman la información de reflectancia de las bandas del sensor en razones o proporciones a modo de índices simples o normalizados que representan las características del suelo que se pretenden evaluar, como el vigor de la vegetación, la presencia de carbonatos,

minerales de arcilla, minerales de hierro y materiales parentales.

Paralelamente se requieren bases de datos de perfiles de suelos, de todo el territorio, que se utilizarán como registros de entrenamiento, para validar análisis de regresión de funciones de transferencia y debidamente georeferenciadas para espacializar la variable a través de una cartografía temática: mapa de texturas, mapa de profundidad, mapa de pH etc.

Se trata de una cartografía orientada a resolver múltiples problemas asociados a la cartografía de suelos tradicional y establecer modelos predictivos en otros ámbitos más allá de la ciencia del suelo propiamente tal como el manejo de humedales y bofedales, secuestro de carbono, agricultura de precisión y manejo integral de recursos naturales.

REFERENCIAS

- Abelbaky, A.; Youssef, M., Naguib, E., Kiwan, M., and E. El Giddawy, (2009). Evaluation of Pedotransfer Functions for Predicting Saturated Hydraulic Conductivity for U.S. Soils. ASABE International Meeting Presentation. Paper N° 097429. Nevada, USA. Pp. 22.
- Aguilar-Duarte, Y; Cano-González, A; Ramírez-Silva, J; y Bautista-Zúñiga, F., (2015). Funciones de Pedotransferencia para Estimar Índices de Calidad en Suelos Agrícolas de Zonas Kársticas. Memorias del XL Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo 2015. Mexico. Pp. 623-627.
- Alex B. McBratney, Budiman Minasny, Stephen R. Cattle, and R. Willem Vervoort. (2002). From pedotransfer functions to soil inference systems. *Geoderma*, 109. Pp. 41-73.
- Coronado, J.G., y H.M., González, (2009). *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. Vol. 18, N° 3. Pp. 59-62.
- Da Silva Gomez, A., de Souza Ferreira, A.C., Machado Pinheiro, E.F., Duarte de Menezes, M., and M. Bacis Ceddia, (2017). The use of Pedotransfer functions and the estimation of carbon stock in the Central Amazon región. *Scientia Agricola*. Vol. 74, N° 6. Pp. 450-460. <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2016-0310>
- FAO. 2017. *Carbono Orgánico del Suelo: el potencial oculto*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura. Roma, Italia. Pp. 90.
- Hadi Rahimi Lake, Ali Akbarzadeh and Ruhollah Taghizadeh Mehrjardi, (2009). Development of pedo transfer functions (PTFs) to predict soil physico-chemical and hydrological characteristics in southern coastal zones of the Caspian Sea. *Journal of Ecology and the Natural Environment* Vol. 1(7). Pp. 160-172.
- Hartemik, A., Mc Bratney, A.B., and M.de L. Mendonça-Santos, (2008). *Digital Soil Mapping with Limited Data*. Springer Science + Business Media B.V. Pp. 446.
- Ibañez, J.J., (2019). La edafometría y sus vicios ocultos. ¿ Donde estarán los datos ?. Blog de José Manuel Ibañez. Doctor en Ciencias Biológicas.
- Investigador del Consejo Superior de Investigaciones Científicas-CSIC, de España.
- INIA, (2014). *Caracterización y propiedades de los suelos de la Patagonia Occidental (Aysen)*. Instituto de Investigaciones Agropecuarias-INIA. Christian Hepp y Neal Stolpe Editores. Boletín INIA N° 298, Coyahique. Aysén. Pp. 159.
- J.C., Watkins, (2016). *An Introduction to the Science of Statistic: From Theory to Implementation*. Preliminary Edition. Arizona, USA. Pp. 426.
- Lagacherie, P., Mc Bratney, A.B., (2007). Spatial soil information systems and spatial soil inference systems: perspectives for digital soil mapping. In P. Lagacherie, A.B. Mc Bratney, M. Voltz, (Eds.), *Digital Soil Mapping: An Introductory Perspective*. Developments in Soil Science, Vol. 3. Elsevier, Amsterdam.
- Le, N.D., and J.V. Zidek, (2006). *Statistical Analysis of Environmental Space-Time Processes*. Chapter Covariances. Springer Series in Statistics. Springer, New York, NY.
- Luzio, W., y S. Alcayaga, (1992). Mapa de Asociaciones de Grandes Grupos de Suelos. Mapa de Chile. *Revista Agricultura Técnica*. N° 52 (4), Pp. 347-353.
- Malone , B. (2011). *Digital Soil Mapping. Getting Operational*. An introductory course of practical exercises for Digital Soil Mapping. Pp. 74.
- Mc Bratney, A., M.L. Mendonça-Santos and B. Minasny, (2003). *On Digital Soil Mapping*. Elsevier Publishing, *Geoderma* 117. Pp. 3-52. www.elsevier.com/locate/geoderma
- Nachtergaele, F.O., (2000). From the Soil Map of the World to the Digital Global Soils and Terrain Database: 1960-2002. Chapter 1. H-5 to H17. In Sumner, M.E. (Ed), (2000). *Handbook of Soil Science*. CRC Press. Boca de Ratón. Florida, USA.
- Nussbaum, M., Ettl, L., Coltekin, A., Suter, B. and E. Markus, (2011). The relevance of scales in soils maps. *Bulletin BGS*, 32. Pp. 63-70. <https://www.researchgate.net/publication/51986078>
- Pachepsky, Y. and M.Th. van Genuchten, (2011). Chapter: Pedotransfer functions. Pp. 556-560. In

Encyclopedia of Earth Sciences Series. Germany.

Pineda, C. y J. Vilorio, (1997). Funciones de pedotransferencia para estimar la retención de humedad en suelos de la cuenca del Lago de Valencia. *Venesuelos*, Vol. 5, N° 1 y 2. Pp. 39-45.

Reyes, E., (2018). Funciones de Pedotransferencia para Determinar la Microporosidad de un Typic Hapludox Sometido a Dos Diferentes Usos. Tesis para optar al título de Ingeniero Agrónomo. Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Universidad de Los Llanos. Villavicencio, Colombia. Pp. 43.

Soil Science Division Staff. 2017. Soil survey manual. C. Ditzler, K. Scheffe, and H.C. Monger

(eds.). USDA Handbook 18. Government Printing Office, Washington, D.C.

Van Looy, K., Bouma, J., Herbst, M., Koestel, J., Minasny, B., Mishra, U., Vereecken, H. (2017). Pedotransfer functions in Earth system science: Challenges and perspectives. *Reviews of Geophysics*, 55, Pp. 1199–1256. <https://doi.org/10.1002/2017RG000581>

Zhang, G.L., Feng, L. & Song Xhiao-dong, (2017). Recent progress and future prospect of digital soil mapping: A review. *Journal of Integrative Agriculture*. Elsevier Publishing. 16 (12). Pp. 2871-2885.