



Resumen de resultados obtenidos en la capacitación de mapeo digital de suelos organizada por la alianza mundial por el suelo en Bogotá, Colombia, verano 2018

8 de agosto de 2018

M. Guevara, G. Olmedo, C. Olivera, S. Bunning y R. Vargas.
Alianza Mundial por el Suelo de las Naciones Unidas

Resumen

Este es un breve resumen del contenido y logros de capacitación en mapeo digital de suelos gracias a los esfuerzos de la alianza mundial por el suelo para construir capacidades nacionales para el desarrollo del sistema de información de suelos de Latinoamérica. Durante el taller de mapeo de suelos en Bogotá Colombia, abordamos una alta diversidad de temas, desde el diseño de funciones de pedotransferencia de la densidad aparente para mejorar los estimados de carbono en suelos, hasta la aplicación de algoritmos de similitud para la clasificación numérica de perfiles de suelo. También generamos vínculos de trabajo entre la taxonomía de suelos y el mapeo digital de suelos para mapear procesos hidrológicos relacionados con los regímenes de humedad edáfica. Los países representados fueron Colombia, Venezuela y Ecuador. Los objetivos del taller los definieron los representantes de cada país de acuerdo a las necesidades de información de sus instituciones. Con este taller dimos un paso importante hacia la modelación de funciones ecológicas del suelo para estimar índices de calidad a partir de la integración de diversas propiedades edáficas representativas de las fases física, química y biológica del suelo. Esta visión integral del mapeo de suelos resulta conveniente para nutrir los diversos sistemas de información de suelos en desarrollo para cada país, con el objetivo principal de generar conocimiento útil a una gran cantidad de usuarios de la información, con diferentes niveles educativos y con distintos propósitos. Concluimos que los esfuerzos de la alianza mundial por el suelo para

desarrollar sistemas de información de suelos representa un elemento invaluable para desarrollar herramientas de gestión social territorial. Con lo que pretendemos mejorar la eficiencia de las políticas públicas actuales para combatir las fuerzas capitales que en tierra, determinan la producción, el consumo y el cambio climático global.

1. Introducción

Los países de Latinoamérica, gracias a la alianza mundial por el suelo, reciben capacitación en mapeo digital de suelos como una herramienta para la generación de nuevo conocimiento que permita habilitar el monitoreo de la condición del suelo y de su capacidad de cumplir con sus funciones ecosistémicas (como su capacidad de producir comida y agua). Latinoamérica es una región rica en datos de suelos colectados por diversas instituciones durante las últimas décadas. El rescate de estos datos puede ser útil para generar herramientas de gestión social-territorial para valorar las funciones de la tierra y mejorar el estado actual de conocimiento requerido para aprovechar nuestros recursos naturales, sin comprometer su disponibilidad futura. Para planear el manejo de recursos naturales, la información de suelos disponible generalmente es colectada en campo con diferentes objetivos, desde la colecta y descripción de perfiles (o barrenas, o cajuelas o muestras superficiales) de suelos con fines de inventario y levantamiento taxonómico de suelos, hasta muestreos dirigidos a cuantificar procesos específicos (i.e., erosión) o atributos específicos asociados a alguna de las funciones ecológicas del suelo (i.e., como su capacidad de almacenar carbono orgánico o de retener agua). Toda esta información puede ser usada como insumo de validación y calibración para reducir la discrepancia en los modelos globales de carbono en suelos y cambio climático. Pero también para generar predicciones precisas de propiedades funcionales o clases de suelos en sitios inaccesibles o áreas que no han sido muestreadas. Para fortalecer la política pública relacionada con la protección del suelo y sus funciones en el ecosistema, la alianza mundial por el suelo pretende mejorar las capacidades de los países participantes, para cuantificar y periódicamente monitorear la variabilidad funcional del suelo y su contribución a ciclos biogeoquímicos globales (i.e., carbono, agua).

2. Justificación

Actualmente una gran incertidumbre domina nuestra capacidad de cuantificar y predecir los efectos negativos de las tendencias climáticas actuales en diversos ciclos biogeoquímicos relacionados con el crecimiento de la vegetación, los cultivos y el funcionamiento de los ecosistemas. Específicamente, la incertidumbre asociada a la información espacialmente explícita sobre propiedades y funciones de los suelos es un hueco de información que representa un problema importante en la planeación efectiva de políticas públicas en torno a la protección de suelos para la mitigación del cambio climático. Reducir los huecos de

información y la incertidumbre de la variabilidad espacial del suelo y sus funciones ecológicas facilitará el desarrollo de herramientas de gestión social territorial para proteger la dinámica de los recursos naturales, suelo y agua.

Analizar la incertidumbre de la información disponible puede ser útil para planificar nuevos muestreos de campo y desarrollar nuevas estrategias de colecta de nuevos y mejores parámetros de suelos. Sin embargo, el rescate, curación, análisis e interpretación de la información de suelos disponible en cada país es fundamental para decidir qué y cómo medir nuevos y mejores parámetros de suelos. La información sobre los suelos que es medida en campo puede ser armonizada con capas de información ambiental para generar superficies continuas de propiedades o clases de suelos con diversos objetivos, desde la planeación del uso de la tierra, hasta los reportes nacionales de emisiones y almacenes de carbono. De tal manera que podemos generar información útil para la gestión territorial y formulación de política pública relacionada con la protección de funciones ecológicas del suelo, en sitios sin información disponible.

3. Enfoque

Este tipo de predicciones de suelos recaen modelos estadísticos que se construyen con hipótesis de trabajo dentro de los límites conceptuales del mapeo digital de suelos. El mapeo digital de suelos asume que una propiedad o clase de suelo puede ser descrita a partir de su ambiente de formación, o de las fuentes de información disponibles para representar el ambiente de formación de suelos (i.e., teledetección, climatología, análisis digital de terreno, mapas geológicos y temáticos). El mapeo digital de suelos es entonces un marco de referencia que actualmente ha sido adoptado por la alianza mundial por el suelo como el mecanismo técnico para la síntesis y generación de nuevo conocimiento sobre suelos en cada país participante. Por tanto, la alianza mundial por el suelo ha invertido en la construcción de capacidades técnicas e institucionales para el mapeo digital de suelos a través de diversos talleres regionales de capacitación dirigidos a los especialistas, analistas y expertos en suelos de cada país participante.

4. Antecedentes

Los esfuerzos de capacitación en mapeo digital de suelos llevados a cabo por la alianza mundial por el suelo en Latinoamérica han facilitado el desarrollo de sistemas nacionales de inferencia espacial de suelos bajo el liderazgo de las instituciones responsables en cada país. Actualmente la secretaría y pilares o puntos focales de la alianza mundial por el suelo en cada país han organizado esfuerzos por fortalecer las capacidades institucionales, analíticas y técnicas para el mapeo digital de suelos al nivel nacional. Un ejemplo de ello es la contribución de cada país con el mapa de carbono nacional requerido por las Naciones Unidas para la elaboración del mapa global de carbono en suelos. Este mapa de carbono se considera un insumo clave para el monitoreo de funciones ecológicas del suelo.

El deterioro de las propiedades funcionales del suelo gracias a la intensificación del uso de suelo o modificaciones a la cobertura vegetal original son factores que amenazan la capacidad del suelo para producir comida, agua y fibras; y son factores que aceleran las tasas de degradación de la tierra y procesos de desertificación de suelos.

La degradación de la tierra causada por la actividad humana, el decline de agua en el suelo, la pérdida de la fertilidad de suelos y la reducción de su potencial natural son problemas de interés común entre las diversas naciones latinoamericanas. Para combatir estos problemas es necesario tomar decisiones basadas en la mejor información disponible. Es por eso que la alianza mundial por el suelo invierte esfuerzos en el desarrollo del sistema de información de suelos de Latinoamérica (sislac). Gran parte de este esfuerzo involucra la participación directa de los países en rescatar e integrar la mejor información disponible para desarrollar productos que puedan contribuir con el contenido del sislac (i.e., datos, mapas, reportes, estimados, metodologías), con el objetivo principal de mejorar el estado actual de conocimiento sobre el suelo y sus funciones en el ecosistema (i.e., identificar reservorios de carbono). Para contribuir con este objetivo, la alianza mundial por el suelo coordina diversos talleres de capacitación regional en mapeo digital de suelos. Estos talleres están dirigidos al personal de las instituciones con el mandato de generar y constantemente actualizar la información sobre los suelos de cada país.

Los participantes del último taller de capacitación en Colombia, durante el verano del 2018, representaron diversas instituciones de gobierno, del sector privado y académicas, con el mandato de la generación de conocimiento espacialmente explícito para la gestión de suelos al nivel territorial. Los países representados fueron Colombia, Venezuela y Ecuador. Los objetivos principales del taller de capacitación en mapeo digital de suelos en Colombia fueron diversos.

5. Objetivos

Los participantes colombianos (10 participantes profesionistas en las áreas de edafología, geomática, ingeniería en agronomía y ambiental, climatología e hidrometeorología) formaron equipos y definieron 3 objetivos principales (1 por equipo): 1) Mejorar los estimados actuales de densidad aparente y de carbono en suelos, 2) combinar diversas propiedades de suelos para generar un índice de calidad y 3) generar una metodología para predecir el régimen de humedad del suelo empleando reglas de clasificación taxonómica de suelos (soil taxonomy), mapeo digital de suelos, y superficies climáticas de precipitación y temperatura.

Los participantes ecuatorianos (analistas del ministerio de agricultura) definieron dos objetivos principales. 1) Generar mapas digitales de propiedades físicas (i.e., textura), químicas (i.e., pH) y biológicas (i.e., carbono orgánico) del suelo al nivel nacional para generar un índice de fertilidad/calidad del suelo. 2) Explorar la disponibilidad de datos de humedad satelital (<https://www.esa-soilmoisture-cci.org/>) y cuantificar la variabilidad anual diaria, para identificar

los momentos apropiados para la preparación de cultivos en relación a la disponibilidad de agua en el suelo.

El representante venezolano (edafólogo), por su parte, se puso como objetivo principal explorar el potencial del conjunto de herramientas para la pedología cuantitativa contenido en el paquete aqp de R (<http://ncss-tech.github.io/AQP/>). Empleando datos propios, Venezuela identificó el perfil de suelos modal de una cuenta de principal interés para la actividad minera y exploró las relaciones numéricas entre los valores de los distintos perfiles disponibles para identificar grupos de perfiles con características similares. Hacia una clasificación estadística de propiedades y perfiles del suelo en Venezuela.

6. Metodología

La metodología del taller fue activo participativa, con las manos en el programa (R). La herramienta principal para la enseñanza fue el libro sobre mapeo digital de suelos recientemente editado por la alianza mundial por el suelo (<http://www.fao.org/documents/card/en/c/I8895EN>). En este libro están documentadas diversas metodologías para el mapeo predictivo de suelos en un formato amigable para usuarios no experimentados. Adicionalmente, los instructores trabajaron al vuelo adaptando códigos de procesamiento y escribiendo nuevos códigos para el análisis e interpretación de resultados dados los datos disponibles para cada ejercicio planteado. Las bases de datos fueron compartidos entre los instructores y participantes vía google drive y los códigos de procesamiento en R a través de github <https://github.com/DSM-LAC/RESOURCES-DSM-COLOMBIA>. Algunas diapositivas fueron empleadas para el apoyo del marco de trabajo, contexto y lectura general sobre mapeo digital de suelos.

7. Resultados y discusión

Los resultados detallados del taller estan documentados en una serie de presentaciones preparadas por los participantes y estan disponibles para su consulta interna en: <https://drive.google.com/drive/folders/1dWa5a8KEo95KE1-5gI3WmyTnD9A4kePr> Estas presentaciones fueron presentadas por los participantes durante el cierre del taller el ultimo dia. Los resultados de este taller corresponden a ejercicios didácticos pero con datos de reales y preguntas de estudio de interés en las instituciones representadas en el curso de mapeo de suelos.

7.1. Densidad aparente y carbono en Colombia

Las imágenes y mayor detalle de información asociada a esta sección ver: <https://drive.google.com/open?id=0Bw3QmpRZVV1KX1NDQ2p1TEJEUGRwbHF1eDJ3Z25pajEwaE1B>

Actualmente existe un hueco conceptual importante en nuestra capacidad de predecir adecuadamente la densidad aparente, y su potencial efecto en el cálculo de carbono edáfico. El equipo de trabajo Colombiano exploró diversas funciones

de pedo transferencia para llenar los huecos de información de densidad aparente, variable que es muy escasa en base de datos colombiana disponible para el cálculo de los reservorios de carbono en suelos. Las funciones de pedotransferencia empleadas para este ejercicio están documentadas en el manual de la FAO para el mapeo digital de suelos (Yigini, 2018). Adicionalmente fueron desarrollada durante el taller una predicción de la densidad aparente de Colombia basada en un técnica de árboles de regresión y minería de datos, empleando la información disponible sobre materia orgánica, textura y los órdenes de suelo (sensu soil taxonomy) presentes el país.

Los resultados muestran que la función desarrollada durante el taller para el caso específico de Colombia resulta una mejor opción para estimar la densidad aparente en sitios sin información accesible. Como es de esperarse, empleando la mejor información disponible a nivel país, genera las el nivel más bajo de error promedio (0.18 gr cm ⁻³), comparado con las funciones de pedotransferencia previamente descritas para otros sitios de investigación en suelos, o en otras regiones climáticas. El error promedio de las otras funciones empleadas para estimar la densidad aparente fue de 0.28 a 0.42 gr cm ⁻³. Los valores promedio de densidad aparente dados los datos disponibles varía de 0.31 a 1.49 gr cm ⁻³.

Nuestros resultados en la densidad aparente tienen implicaciones en los cálculos de los reservorios de carbono de 5.5

Concluimos que el desarrollo de una función de pedotransferencia específica para cada caso es importante considerar, aun cuando los datos disponibles sean pocos. La aplicación de una función de pedotransferencia aplicada a datos con otras características edafo-genéticas puede generar incertidumbre que se propaga a los estimados de contenidos de carbono en suelos. Contar con estimados precisos sobre el carbono en suelo (y de otras propiedades y funciones edáficas) es una presión importante para el desarrollo de herramientas de gestión social para el manejo del territorio y para la formulación de política pública relacionada con al aprovechamiento de recursos naturales. Los reservorios de carbono nacionales con respecto al mapa anterior (y usando esta nueva función de pedotransferencia para la densidad aparente) bajaron de 7.5 a 7.1 Pg de carbono en los primeros 30 cm de suelo.

7.2. Índice de calidad de suelos

Las imágenes y mayor detalle de información asociada a esta sección ver:

<https://drive.google.com/open?id=0Bw3QmpRZVV1KTXhTVjNuT2xxVTA4LU9LSVJQWkh1M3VheDdn>

La fase química, física-estructural y biológica del suelo son componentes fundamentales para interpretar su vocación y calidad para cumplir alguna función productiva. Hay muchas combinaciones de variables descritas en la literatura para definir la calidad del suelo. Los datos de descripciones de perfiles de suelo son comúnmente las fuentes de información para la generación de estos índices. En este trabajo nos enfocamos a entender una pregunta básica para la predicción de estos índices en áreas sin disponibilidad de datos. Nos preguntamos que sería más conveniente? si modelar cada propiedad de suelos por separado y luego estimar un índice con álgebra de mapas o bien, estimar un índice en cada

punto y luego modelar este índice. Si modelamos cada propiedad por separado vamos a acarrear la incertidumbre de cada propiedad modelada. Si estimamos un índice en cada punto o dato disponible y luego modelamos el índice, estamos modelando una variable muchas veces más compleja que una variable del suelo individual.

Generamos un modelo de trabajo orientado por el mapeo digital de suelos e implementamos una estrategia de modelación basada en ensamblajes lineales de modelos dirigidos por datos y modelos dirigidos por hipótesis (Guevara et al. 2018) para mapear propiedades del suelo. Generamos modelos predictivos de textura de suelos (arenas, limos y arcillas), para representar la fase física. Generamos modelos de pH y de % de saturación de bases para representar la fase química. Generamos modelos de materia orgánica para representar la fase biológica. Empleamos datos provenientes de 267 perfiles y 111 muestras de suelo analizadas en los alrededores de Bogotá, Colombia, en un clima templado sub-húmedo con suelo bien desarrollados y ricos en materia orgánica. Las covariables empleadas fueron preparadas para los participantes a 1km de resolución espacial durante talleres anteriores. El índice de calidad fue definido y discutido durante el taller considerando la disponibilidad de datos. Generamos residuales independientes para la validación de nuestros resultados dejando iterativamente subconjuntos de datos y repitiendo los modelos muchas veces en una estrategia conocida como validación cruzada repetida.

Nuestros modelos lograron explicar cerca 50% de la varianza de las propiedades analizadas. También encontramos que el índice fue explicado mejor por las variables independientes, ya que modelando el índice ya calculado la varianza explicada derivada de la validación cruzada se reduce a 13%. Esta reducción en la varianza explicada puede ser atribuida a la elevada complejidad de una variable compuesta, como un índice de calidad de suelos, en comparación con una propiedad individual del suelo que es más dependiente de una relación suelo-paisaje. Por tanto concluimos que, considerando los diversos niveles de incertidumbre, resulta más conveniente mapear propiedades menos complejas de suelo y luego combinarlas con propiedades más complejas, que mapear desde un inicio propiedades complejas o índices compuestos de suelos, porque pueden generar problemas de precisión, exactitud y patrones no realistas en los productos derivados finales.

El equipo Ecuatoriano hizo lo propio con sus bases de datos. El equipo de Ecuador generó mapas de propiedades del suelo y actualmente se encuentra desarrollando un mapa de índice de calidad de suelos para su país. Durante el taller de Bogotá, solo fue posible entrenar los modelos predictivos de las variables individuales y generar predicciones de ellas a 1km de resolución espacial (logrando entre 20 y 40% de varianza explicada). Es importante considerar que la definición de calidad de suelo es delicada y puede variar de un lugar a otro. En este ejercicio el enfoque fue el manejo de datos y estrategias de modelación. El equipo Ecuatoriano está trabajando en una mejor estrategia de integración de variables para definir el índice de calidad con base en conocimiento experto en suelos. Advertimos que la definición de calidad de suelo para un sitio en particular debe de estar informada con conocimiento experto sobre suelos, el

sitio y sobre la relación suelo-paisaje, considerando la diversidad productiva del suelo.

7.3. Mapeo del régimen de humedad de suelos

Las imágenes y mayor detalle de información asociada a esta sección ver:

<https://drive.google.com/open?id=0Bw3QmpRZVV1KQ091VF9PQk9CS0VuNjZ3djhWd1p0SU9BVWsw>

El vínculo entre la taxonomía de suelos y el mapeo digital de suelos es fundamental para hacer predicciones de suelos confiables e interpretables, realistas. Por otro lado, hacer mapas digitales de suelo en compañía de expertos en suelos favorece la formulación de hipótesis interesantes para resolver grandes retos científicos, como la caracterización detallada de la variabilidad espacial y temporal del suelo seco o húmedo. La humedad del perfil edáfico es crítica para el desarrollo de los socio-ecosistemas. Definiendo secciones de control para caracterizar la humedad del perfil de suelos, el objetivo fue la incorporación de reglas de clasificación taxonómica de la humedad de suelos en la predicción espacial del número de días de suelo seco a lo largo del año en el valle del Cauca, Colombia.

Estudiamos las secciones de control de humedad edáfica y generamos mapas de ellas basada en mapeo digital de suelos. Estas las reglas de clasificación para la definición de los regímenes de humedad en el suelo fueron desarrolladas por la escuela de suelos Norteamericana USDA-Soil taxonomy (Soil Survey Staff. 1999). Estimamos para cada punto la capacidad de almacenamiento de agua aprovechable a partir de un modelo de balance hídrico del suelo caracterizando la oferta y demanda de agua. Para esto generamos mapas multitemporales de variables climáticas (1981-2010 con frecuencia cada 10 días) incluyendo temperatura, precipitación efectiva y escorrentía. Fueron usadas técnicas estadísticas convencionales para generar superficies climáticas multitemporales a partir de datos estaciones meteorológicas. También generamos mapas multitemporales de evapotranspiración potencial y generamos un conteo sobre el número de días secos para estimar el régimen de humedad de suelos. Aunque nuestros resultados acarrear diversos niveles de incertidumbre. Nuestro marco de trabajo revela patrones espaciales sobre el comportamiento hidrológico del suelo a partir de técnicas de modelación robustas, en sitios que no han sido mapeados previamente y que son importantes áreas de producción agrícola en la región. La información generada en este trabajo puede ser usada para una mejor planeación del uso de la tierra para la conservación de las funciones hidrológicas del suelo.

Generamos un marco de trabajo reproducible para interpolación automática de series de tiempo climáticas para entender el comportamiento hidrológico del suelo en áreas sin información disponible. Nuestra aproximación muestra el potencial del mapeo digital de suelos para entender procesos hidrológicos regulados por el suelo. Aunque actualizar la información sobre la humedad edáfica en los suelos de Colombia representa un gran reto logístico, conceptual y potencialmente tardado, concluimos que el marco conceptual de nuestro trabajo puede ser aplicado globalmente, empleando fuentes de información pública y plataformas de procesamiento de código abierto.

7.4. Humedad de suelos en el Ecuador

Las imágenes y mayor detalle de información asociada a esta sección ver:

<https://drive.google.com/open?id=0Bw3QmpRZVV1KaTQzeVlj0VNSM0xrSWliT3RTSGdXY1Z5V1Y4>

Los ecuatorianos recibieron capacitación en la obtención, análisis e interpretación de los datos de humedad satelital que provee la agencia espacial europea (esa) <https://www.esa-soilmoisture-cci.org/>. El principal interés tiene que ver con mejorar las capacidades para informar el manejo de la tierra, por ejemplo, para dar inicio a la preparación de cultivos para armonizar la temporada de siembra con la climatología de la humedad de suelo y aprovechar al máximo el recurso hídrico para la temporada de crecimiento. Por tanto el objetivo fue la inspección de datos satelitales de humedad y la descripción estadística de la humedad de suelo diaria entre los noventas y 2016, cubriendo el periodo más reciente de la base de datos disponible gracias a la esa.

Generamos códigos para la lectura de los archivos originales y para estimar el número de datos por pixel, y para visualizar la variabilidad anual de la humedad de suelos. Esta base de datos representa la humedad de los primeros 5 - 10 cm de suelo, y es derivada de sensores satelitales activos que usan microondas de radio que logran detectar el contenido volumétrico de agua en el suelo. Estos sensores tienen huecos de información y tienen píxeles de gran escala (25-50km). Un primer paso fue conocer la variabilidad espacial de píxeles con datos válidos, después usamos gráficas de caja y bigotes para mostrar la variabilidad y estadística descriptiva básica para comparar entre años.

Encontramos un patrón consistente de datos en la zona norte-oeste, donde existen importantes áreas de producción agrícola. La región sur-este es una zona con menor disponibilidad de datos, principalmente hacia los climas de lluviosos dominados por bosques tropicales húmedos de tipo amazónico. En estas áreas el sensor falla porque el contenido de agua en la vegetación es mucho mayor al contenido de agua en el suelo, por tanto la señal se satura y el estimado es menos preciso (McColl. et al 2017). Por tanto exploramos las posibilidades del mapeo digital de suelos para llenar estos huecos de información haciendo uso de modelos predictivos y encontramos evidencia cuantitativa de la relación topografía y satellite. Encontramos con los datos disponibles un curva de humedad que llega a su máximos promedio de ($0.4 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$) en enero, y que disminuye de febrero a octubre hasta un promedio de humedad que oscila alrededor de $0.2\text{m}^3\text{m}^{-3}$. Noviembre y diciembre son meses de una rápida recuperación, la cual encontramos más débil durante 2015 y 2016 ($0.4 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$). Concluimos que los datos satelitales sobre humedad de suelos proveen información valiosa que puede ser usada para informar planes de manejo de la tierra. Sin embargo esta información es limitada y debemos explorar los modelos predictivos usando variables de terreno para llenar estos huecos de información. Mucha gente vive sequías y por tanto hay que tomar decisiones para conservar el agua basadas en la mejor información disponible. Entonces existe una presión urgente por mejorar el estado de conocimiento actual sobre la dinámica de la humedad del suelo y su contribución al ciclo global del agua.

7.5. Clasificación numérica de perfiles en Venezuela vía el paquete aqp de R

Las imágenes y mayor detalle de información asociada a esta sección ver:

<https://drive.google.com/open?id=0Bw3QmpRZVV1KQ091VF9PQk9CS0VuNjZ3djhWd1p0SU9BVWsw>

El paquete de herramientas para la pedología cuantitativa (Beaudette y O'Geen, 2013) ofrece un potencial muy grande para analizar y visualizar datos de suelos provenientes de descripciones de perfiles de suelo. Para facilitar la lectura de los patrones y gradientes naturales del suelo es importante incluir una perspectiva cuantitativa, hacia una clasificación estadística de unidades funcionales del suelo. Para demostrar el uso de esta herramienta el equipo venezolano se concentró en la comparación de diversos perfiles seleccionados aleatoriamente a lo largo de la cuenca del Canoabo, Venezuela. Los objetivos planteados fueron a) adquirir destreza en el manejo del paquete aqp y su función SoilProfileCollection y 2) aplicar la función en un ejemplo del estudio de los suelos de la cuenca del río Canoabo en Venezuela para clasificar numéricamente los perfiles de suelo.

El área de trabajo tiene las siguientes características: Superficie: 14.000 ha, Geomorfología: laderas de montañas, valle central estrecho Cobertura Vegetal: bosques altamente intervenidos. Elevación: 130 a 177 metros sobre el nivel del mar. Función: Producción de agua. Problemas: Erosión, Tala y quema, contaminación de ríos, colmatación del embalse. Empleando el paquete aqp se calcularon rápidamente perfiles modales de calcio, pH, materia orgánica y fósforo en los suelos de la cuenca con base en 12 perfiles escogidos representativos de los ambientes geomorfológicos principales. Estimamos distancias euclidianas entre los valores de los perfiles y generamos automáticamente una matriz de similitud para distinguir los grupos de perfiles asociados a los grupos de valores.

Encontramos que la materia orgánica y el pH son las propiedades de suelo que más afectan la matriz de disimilitud. Los resultados de la matriz de disimilitud captura las diferencias entre grupos de suelos. Los 12 perfiles de suelo fueron agrupados correctamente considerando la clasificación taxonómica de grupos de suelo en cada perfil. Concluimos que el paquete aqp de R es una buena herramienta para el análisis visual intra e inter sitios de suelos de una región. Permite análisis y comparaciones cuantitativas entre las propiedades de los horizontes de un mismo suelo y entre suelos. Permite un manejo fácil de una tabla que originalmente era muy compleja. Muestras gráficos de profundidad. Permite analizar la similitud (cuantitativas) entre los sitios para restablecer los límites de las unidades cartográficas de suelos. Permite identificar inconsistencias en los datos, mediante el análisis de similitud y la taxonomía de suelos establecida.

8. Conclusion general

Las capacidades en mapeo digital de suelos en Latinoamérica promovidas por la alianza mundial por el suelo comienzan a generar nuevos resultados que pueden potencialmente convertirse en herramientas de gestión social territorial

para mejorar 1) el estado actual de conocimiento sobre los suelos y sus funciones y 2) mejorar las capacidades técnicas e institucionales en las instituciones para habilitar el monitoreo de los suelos y de sus funciones en el ecosistema. En este taller logramos mejorar los estimados de densidad aparente en los datos de Colombia que son requeridos para el cálculo de carbono edáfico. También logramos incorporar nuevo conocimiento para la traducción de propiedades de suelo a funciones o índices más complejos como calidad o fertilidad, y también logramos que las instituciones vieran el potencial de nuevas fuentes de información y de nuevas metodologías para caracterizar el componente hidrológico del suelo, haciendo uso de conocimiento experto (regímenes de humedad) y sensores de percepción remota para caracterizar la humedad de suelos. Adicionalmente socializamos con diversos edafólogos participantes diversas herramientas para la pedología cuantitativa y por tanto, nuestros resultados tienen implicaciones positivas en el desarrollo de los sistemas nacionales de información de suelos en Latinoamérica.

9. Referencias

Beaudette, D.E. and O'Geen, A.T. Algorithms for Quantitative Pedology: A Toolkit for Soil Scientists *Comput. Geosci.* 52, 258–268, (2013) doi:10.1016/j.cageo.2012.10.020

Guevara, M., Olmedo, G. F., Stell, E., Yigini, Y., Aguilar Duarte, Y., Arellano Hernández, C., Arévalo, G. E., Arroyo-Cruz, C. E., Bolívar, A., Bunning, S., Bustamante Cañas, N., Cruz-Gaistardo, C. O., Davila, F., Dell Acqua, M., Encina, A., Figueredo Tacona, H., Fontes, F., Hernández Herrera, J. A., Ibelles Navarro, A. R., Loayza, V., Manueles, A. M., Mendoza Jara, F., Olivera, C., Osorio Hermosilla, R., Pereira, G., Prieto, P., Ramos, I. A., Rey Brina, J. C., Rivera, R., Rodríguez-Rodríguez, J., Roopnarine, R., Rosales Ibarra, A., Rosales Riveiro, K. A., Schulz, G. A., Spence, A., Vasques, G. M., Vargas, R. R., and Vargas, R.: No silver bullet for digital soil mapping: country-specific soil organic carbon estimates across Latin America, *SOIL*, 4, 173-193, <https://doi.org/10.5194/soil-4-173-2018>, 2018.

McCull, K. A., S. H. Alemohammad, R. Akbar, A. Konings, S. Yueh, and D. Entekhabi, 2017a: The global distribution and dynamics of surface soil moisture. *Nat. Geosci.*, 10, 100–104, <https://doi.org/10.1038/ngeo2868>.

Soil Survey Staff. 1999. Soil taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. 2nd edition. Natural Resources Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook 436.

Yigini, Y., Olmedo, G.F., Reiter, S., Baritz, R., Viatkin, K. and Vargas, R. (eds). 2018. Soil Organic Carbon Mapping Cookbook 2nd edition. Rome, FAO. 220 pp.