

CORRELACIÓN ENTRE LOS ÍNDICES ESPECTRALES Y EL ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO DE SUELO PARA GENERAR MAPAS NUTRICIONALES DE SUELO

CORRELATION BETWEEN SPECTRAL INDICES AND PHYSICOCHEMICAL SOIL ANALYSIS TO GENERATE NUTRITIONAL MAPS

¹ Claudia Patricia Castro Vargas¹ Angela Rosio Urrego Tunjuelo

Recibido: 02-02-2022

Aceptado: 08-02-2022

- 1 Colombiana. Ingeniera Agrónoma. Especialista en Ordenamiento y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas. Magister en gestión de cuencas hidrográficas. Centro de Formación agroecológico y empresarial, Regional Cundinamarca, SENA, Colombia. <https://orcid.org/0000-0001-9380-5833>. cpcastro@sena.edu.co
- 2 Colombiana. Ingeniera Agrónoma. Especialista en Formulación de proyectos. Candidata a Magister en gerencia de la innovación en proyectos. Centro de Formación agroecológico y empresarial, Regional Cundinamarca, SENA, Colombia. <https://orcid.org/0000-0003-0611-5135>. arurrego@sena.edu.co

RESUMEN

La aplicación de técnicas de agricultura de precisión como herramienta de toma de decisiones para establecer el comportamiento espacial de los suelos permite optimizar el uso de los diferentes recursos agrícolas, con el fin de mejorar la sostenibilidad y la competitividad, reduciendo el riesgo de degradación ambiental y mejorando su rentabilidad. El objetivo del presente estudio es realizar la correlación del índice espectral de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) con los análisis de suelos físicos químicos para generar los mapas nutricionales de suelos que se utilizan como herramienta para la formulación de planes de fertilización ajustados a los requerimientos del cultivo de limón tahiti. Esta investigación se localizó en Municipio de Tibacuy, Vereda Siberia, Finca el porvenir con Coordenadas Longitud 4.352642 Latitud 74.4385. El proyecto se desarrolló en cinco etapas: Identificación espacial del área productiva y determinación del muestreo dirigido, segunda etapa toma estratificada de suelo y envío a laboratorio de las muestras, la tercera etapa corresponde al uso de técnicas de análisis espacial, la cuarta etapa establece los mecanismos de geoproces-

amiento de las imágenes tomadas con dron y la estimación de índices espectrales a partir de la Cámara Multiespectral Parrot Sequoia (Parrot SA, France) y la quinta etapa correlación multivariable para el área productiva y elaboración de mapas nutricionales de suelo. Los resultados obtenidos permitieron identificar correlación positiva entre el NVDI y el mapa de distribución de carbono orgánico.

Palabras claves: Agricultura, mapas, nutrientes, precisión, sol.

Abstract

Applying precision agriculture techniques as a decision-making tool to establish the spatial behavior of soils, allows optimizing the use of different agricultural resources, reducing the risk of environmental degradation, and improving sustainability, competitiveness, and profitability of lands. The aim of this study is to correlate the spectral index of Normalized Difference Vegetation (NDVI) with the physicochemical soil analysis in order to map nutrients on the soil. These maps are used as a tool for the formulation of fertilization plans adjusted to the requirements of the Tahiti lemon crop. This research was developed in the Municipality of Tibacuy, Siberia village, El porvenir farm (Coordinates: Longitude 4.352642- Latitude 74.4385). The project was developed in five stages: First, Spatial identification of the productive area and determination of directed sampling; second, stratified soil sampling and shipping to the laboratory; third, Implementation of spatial analysis techniques; fourth, geoprocessing mechanisms of the images taken using a drone and estimation of spectral indices from the Parrot Sequoia Multispectral Camera (Parrot SA, France); and the fifth stage corresponds to multivariable correlation for the productive area and preparation of soil nutritional maps. The results obtained allowed us to identify a positive correlation between the NVDI and the organic carbon distribution map.

Keywords: Agriculture, maps, nutrients, precision, soil.

Introducción

La agricultura de precisión es un conjunto de técnicas orientadas a optimizar el uso de los insumos agrícolas (semillas, fertilizantes, agroquímicos y correctivos), en función de la cuantificación de la variabilidad espacial y temporal de la producción agrícola. Esta optimización se logra con la distribución de la cantidad correcta de esos insumos, dependiendo del potencial y la necesidad de cada punto de las áreas de manejo (Bongiovanni *et al.*, 2006).

Dentro de las aplicaciones de la AP, los muestreos georreferenciados de suelos permiten mapear las variaciones de fertilidad dentro de las áreas cultivadas y definir intervenciones de manejo localizado (o sitio-específico) (IICA Y PROCISUR, 2014); dado que las características del suelo y del cultivo varían en el espacio (distancia y profundidad) y en el tiempo. En este contexto la investigación, extensión e innovación de los segmentos relacionados al área agrícola se han realizado para enfrentar esos nuevos desafíos, llegando a la conclusión que la generación de tecnología permite desarrollar técnicas que cuantifiquen y manejen diferenciadamente la variabilidad natural del área productora (Claret 2006).

Por lo tanto, en esta investigación se realizó la toma de imágenes aéreas RGB (Red-Green-Blue), térmica y multiespectral de alta definición del área de estudio correlacionando con análisis físico y químicos de suelos, haciendo uso de la técnica de muestreo espacial estratificado (Minasny y McBratney, 2006), para generar una correlación multivalente entre los índices espectrales y las propiedades físico - químicas

de suelo, que proporcionan herramientas para una adecuada toma de decisiones en el cultivo, integrando de esta forma nuevas alternativas tecnológicas de la agricultura de precisión (AGP) en los modelos productivos convencionales.

El cultivo seleccionado fue Limón Tahití (*Citrus latifolia Tanaka*) ubicado en el municipio de Tibacuy, Cundinamarca, donde se adapta a las condiciones de la zona y aporta a la economía local, destacando la fertilización como una labor fundamental para la producción del cultivo; sin embargo se genera pérdida de los fertilizantes cuando éstos se utilizan en mayor cantidad de la que pueden absorber los cultivos, o cuando se eliminan por acción del agua o del viento de la superficie del suelo antes de que puedan ser absorbidos.

Teniendo en cuenta la relevancia que toma la fertilización en los rendimientos del cultivo; el objetivo de la investigación es obtener la correlación de los índices espectrales más relevantes aplicables para todos los sistemas productivos, como lo son: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), Diferencia Normalizada de Borde Rojo (NDRE) y el Índice de Clorofila Verde (GCI), con los análisis de suelos físico químicos para generar los mapas nutricionales de suelos que se utilizan como herramienta para la formulación de planes de fertilización ajustados a los requerimientos del cultivo.

En la investigación se desarrolló las siguientes etapas: precampo, la cual abarca desde la identificación espacial del área productiva, hasta la determinación del muestreo dirigido, mediante técnica de análisis espacial, la segunda etapa corresponde a la etapa de campo, donde se aplica una metodología de toma estratificada de suelo, registro y envío a laboratorio de las

muestras, la tercera etapa corresponde al uso de técnicas de análisis espacial, comenzando desde la consolidación de las bases de datos del resultado de laboratorio de suelos, hasta la aplicación de técnicas de geoestadística para la determinación del estado nutricional del sistema productivo con el uso del R, la cuarta etapa establece los mecanismos de geoprocetamiento de las imágenes tomadas con dron o Vehículo Aéreo No Tripulado (UAV, por sus siglas en inglés), además de la estimación de índices espectrales a partir de la Cámara Multiespectral Parrot Sequoia (Parrot SA, France), la quinta etapa y finalmente mediante el uso de los insumos anteriormente mencionados realizar la aplicación de técnicas multivariadas para la determinación y cuantificación de la correlación multivalente para el área productiva. Con los resultados de la correlación se realizan los planes de fertilización ajustados.

Materiales y métodos

La agricultura de precisión (AGP) es la aplicación de tecnologías y principios para gestionar la variabilidad espacial y temporal asociada a todos los aspectos de la producción agrícola empleando técnicas para recopilar, procesar y analizar datos espaciales y temporales con el fin de orientar acciones específicas que mejoren la eficiencia, la productividad y la sostenibilidad de las operaciones agrícolas (Lowenberg y Erickson, 2019; Schrijver et al., 2016; Abdullahi et al., 2015).

Esta investigación se localizó en Municipio de Tibacuy, Vereda Siberia, Finca el porvenir con coordenadas planas Longitud 4.352642 Latitud 74.4385.

En la etapa **precampo** la cual consistió en la identificación del área productiva a estudiar, teniendo en cuenta esto se realizó un análisis básico de terreno y se estableció la variabilidad espacial de las propiedades biofísicas del terreno,

esta etapa finalizó la determinación de los puntos de muestreo, a partir del uso de la técnica de muestreo espacial estratificado denominado Hiper-cubo Latino Condicionado (CLHS).

Se obtuvo la información necesaria para realizar la identificación espacial de áreas y perímetros del sistema productivo con la ayuda e implementación de apps gratuitas de georreferencia espacial (GPS) que permitan la obtención de datos o información en formato kml, kmz, shp file etc. Es importante resaltar que esta información puede interactuar en cualquier software de procesamiento SIG, a través de un archivo kml, kmz, shp file etc, lo cual permite una interoperabilidad muy rápida en todo el geoproceso de medición.

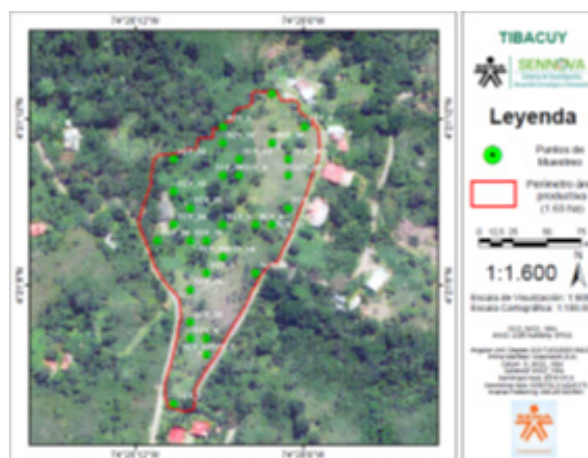
Se realizó el análisis de los parámetros biofísicos, se estimaron usando el software libre SAGA (Sistema para Análisis Geocientíficos Automatizados) el cual es un Sistema de Información Geográfica (SIG) de código abierto utilizado para editar y analizar datos espaciales para el análisis de datos vectoriales (punto, línea y polígono), tabla, cuadrícula e imagen. Entre otros, el paquete incluye módulos para geoestadística, clasificación de imágenes, proyecciones, simulación de procesos dinámicos (hidrología, desarrollo del paisaje) y análisis del terreno.

Para la presente metodología se usó la estrategia de muestreo del Hiper-cubo Latino Condicionado (conditioned Latin Hypercube - cLHS) propuesto por Minasny y McBratney (2006). El cLHS es un procedimiento aleatorio estratificado y eficiente a la hora de muestrear variables con distribuciones multivariantes como lo son Modelo Digital de Elevación – (MDE), sombreado analítico, pendientes, índice topográfico de humedad y factor de pérdida de suelo.

Para ubicar el punto de muestro se usaron dispositivos de navegación disponibles, dentro de los cuales se encuentra GPS, Tablet, APP gratuitas o

de uso comercial (Figura 1).

Figura 1. Puntos de muestreo de Tibacuy. Elaboración propia.



Fuente: elaboración propia.

En cuanto a la toma de las 30 muestras de suelos se siguió el Instructivo de Levantamiento de Suelos a diferentes escalas que tiene la Subdirección de Agrología del Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC (IGAC, 2018) dentro de los cuales se resalta la toma de submuestras, el diligenciamiento de la etiqueta de identificación de la muestra. Además, es recomendable que, en el momento de la recolección de las muestras para análisis químico y físico de suelos, se realice una muestra compuesta. Luego de tomar la muestra de suelo representativa, se procede al etiquetado para cada PCM (Punto central de muestreo) y posterior envío al laboratorio.

Para el análisis de la variabilidad espacial se realizó, una serie de pasos, los cuales son inherentes al proceso de modelado espacial. Dentro de estos los más relevantes se establecieron: i) Clasificación Textural, ii) Análisis exploratorio y estadística básica, iii) Cuantificación de la de-

pendencia espacial, iv) aplicación de Técnicas de Geoestadística.

Para el análisis de la textura se utilizó el software RStudio y el lenguaje de código abierto a partir de la Librería *soiltexture* (Moeys, 2018), la cual sigue la metodología del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (Staff Soil Survey, 2014).

Para el análisis exploratorio se procedió a la determinación de algunas medidas de tendencia central, para cada una de las variables reportadas por el laboratorio. Este procedimiento se realizó con ayuda del software RStudio, aplicando las metodologías de las librerías *ggplot2* (Wickham, 2011) y *GGally* (Schloerke et al., 2018).

Para las medidas de dependencia espacial se determinó el Índice de Moran (*I Moran*) (Anselin, 1995). El *I Moran* el cual varía entre -1 y 1 ; un valor cercano a 1 indica una alta autocorrelación positiva, mientras que valores cercanos a -1 indican autocorrelación negativa, por el contrario, un valor próximo a cero significa que no existe un patrón espacial o que la dispersión de las observaciones en el espacio es completamente aleatoria (Fu et al., 2014).

Luego de determinar las variables que cumplen con todos los supuestos del método Kriging desarrollado por Krige (1951), se usó el software RStudio, específicamente la librería *gstat* (Pebesma, 2004) donde se encuentra de una manera detallada la metodología. Para las áreas productivas de cada zona de estudio en las cuales se empleó esta metodología para poder determinar la representación las principales propiedades Físico – Químicas que tienen una alta variabilidad espacial para las zonas establecidas.

Para la generación de los insumos proporcionados con imágenes multiespectrales y térmicas para cada área productiva del proyecto, existen compañías que suministran estos insumos. Realizó el levantamiento de fotogrametría multiespectral y fotografía térmica del área de estudio,

con la ayuda de Drones o UAV se pudo Determinar los índices espectrales necesarios para la investigación del proyecto.

Los Drones y equipos multiespectrales y térmicos usados en la toma de información que se requería en las zonas establecidas fueron: un DJI MAVIC 2 Enterprise Advance (DJI, 2021), el cual posee una cámara Dual RGB, Thermal y un Dron DJI Phantom 4 Pro (DJI, 2017), la cual le fue incorporada una cámara multiespectral Parrot Sequoia (Parrot SA, France). A partir de la toma de información con los equipos descritos anteriormente por la empresa ANKA, se generó la consolidación de las imágenes, i) RGB (Red-Green-Blue) o color verdadero, ii) imagen térmica y iii) imagen multiespectral; el i) y ii) fueron tomadas con el DJI MAVIC 2 Enterprise Advance, el producto iii) fueron generadas con el equipo DJI Phantom 4 Pro y la cámara Parrot Sequoia. Las cámaras RGB y multiespectrales, las cámaras térmicas también se utilizan con drones para aplicaciones agrícolas. Las cámaras térmicas detectan radiación en la región infrarroja de longitud de onda larga (8.000 a 14.000 nm). Cuanto mayor sea la temperatura de un objeto, mayor será la radiación térmica emitida.

Teniendo en cuenta las bandas espectrales obtenidas a partir de la cámara **Parrot Sequoia** y de la información multiespectral, se determinaron algunos índices espectrales más relevantes aplicables para todos los sistemas productivos, los cuales son: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), Diferencia Normalizada de Borde Rojo (NDRE) y el Índice de Clorofila Verde (GCI). Dónde:

NIR: Near infrared, que para la Parrot Sequoia, se encuentra entre (790nm $\pm$ 40nm).

Red Edge: Red edge, que para la Parrot Sequoia, se encuentra entre (735nm $\pm$ 10nm).

NIR: Near infrared, que para la Parrot Sequoia, se encuentra entre (790nm $\pm$ 40nm).

RED: Red, que para la **Parrot Sequoia**, se en-

cuentra entre (660nm $\pm$ 40nm).

NIR: Near infrared, que para la **Parrot Sequoia**, se encuentra entre (790nm $\pm$ 40nm).

Green: Banda Verde, que para la **Parrot Sequoia**, se encuentra entre (550nm $\pm$ 40nm)

A partir de todos los análisis descritos anteriormente, se aplicaron técnicas multivariadas para la determinación y cuantificación de la correlación multivalente para cada una de las áreas productivas. Esto se realizó con el software de la Statgraphics (Centurion XVIII, Statgraphics.Net, Madrid) y con el software RStudio, específicamente con las librerías ggplot2 (Wickham, 2011) y GGally (Schloerke et al., 2018).

Finalmente, Luego de determinar las variables que cumplen con todos los supuestos del método Kriging desarrollado por Krige (1951), los cuales se encuentran especificados por Giraldo (2002). Para este proceso, se usó el software RStudio, específicamente la librería gstat (Pebesma, 2004) donde se encuentra de una manera detallada la metodología.

Resultados y discusión

3.1 Clasificación Textural

La textura es la distribución de las partículas del suelo. Expresada en porcentaje. Estas partículas son: la arena (2 - 0.02 mm), el limo (0.02 - 0.002 mm) y la arcilla (0.002) (Ramírez, 1997)

Al procesar la información de las 30 muestras de la unidad productiva con el software RStudio se genera la figura 2 y la tabla 1:

Figura 2. Clasificación Textural del área productiva de Tibacuy.

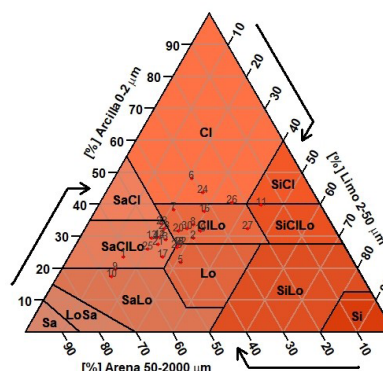


Tabla 1. Estadística de la clasificación textural

Clasificación Textural	Símbolo	Muestras
Arcilloso	CI	3
Franco	Lo	1
Franco arcilloso	CI Lo	11
Franco arenoso	Sa Lo	2
Franco arenoso arcilloso	Sa CI Lo	12
Franco limoso arcilloso	Si CI Lo	1
Total Muestras		30

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo a González y Tullo en el 2019 los mejores suelos para cítricos son los de textura media a arenosa (arenoso-franco a franco-arenoso); en el área de estudio se presentaron

6 clases texturales predominando las texturas Franco arcilloso y Franco arenoso arcilloso en un 36,7% y un 40% respectivamente, es decir, son texturas moderadamente finas, para el caso de textura de Franco arenoso se obtuvo 2 muestras que representan el 6,6%, en este sentido se infiere que en gran parte del lote se tendrá dificultad en el movimiento del agua en el suelo, un drenaje lento que implicara el montaje de canales de drenaje para la evacuación de láminas de riego altas e implementación de mulch para evitar encostramientos.

La gran mayoría de las propiedades fisicoquímicas están influenciadas por la granulometría: estructura, color consistencia, porosidad

aireación, permeabilidad, hidromorfía, retención de agua, lavado, capacidad de cambio, y reserva de nutrientes (Jaramillo, 2002)

3.1 Clasificación Textural

Para el análisis exploratorio se procedió a la determinación de algunas medidas de

tendencia central, para cada una de las variables reportadas por el laboratorio. Este procedimiento se realizó con ayuda del software RStudio, aplicando las metodologías de las librerías ggplot2 (Wickham, 2011) y GGally (Schloerke et al., 2018) En las siguientes tablas 2 y 3 se presentan los resultados de la estadística descriptiva univariante del Municipio de Tibacuy.

Tabla 2. Estadística descriptiva univariante del Municipio de Tibacuy.

PROPIEDAD	pH	COS	MO	S	P	Ca	Mg	K	Na	Al + H	CICE	Cu	Fe
	1:1	%		mg kg ⁻¹		cmolc kg ⁻¹						mg kg ⁻¹	
Mínimo	4,68	0,43	0,74	0,04	0,14	0,97	1,32	0,08	0,02	0,00	5,15	0,97	15,23
Máximo	6,57	2,08	3,58	9,31	73,19	14,31	11,12	0,87	0,22	3,48	21,32	7,55	288,31
Promedio	5,72	1,32	2,27	1,31	9,40	7,18	4,38	0,26	0,10	0,48	12,41	2,51	88,26
Mediana	5,55	1,38	2,37	0,15	2,68	6,86	3,99	0,18	0,11	0,05	11,89	2,22	73,83
Desviación estándar	0,54	0,43	0,75	2,49	15,04	3,53	2,23	0,19	0,05	0,81	4,64	1,24	51,96
Asimetría	0,00	-0,03	-0,03	2,13	2,69	0,47	1,10	1,59	0,52	1,98	0,27	2,22	1,97
Kurtosis	1,83	1,93	1,93	6,41	11,15	2,35	4,01	4,84	2,56	6,94	2,03	9,59	8,17
Coef. Var %	9,50	32,86	32,86	189,12	159,90	49,15	50,78	72,80	51,17	166,50	37,36	49,15	58,87

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Estadística descriptiva univariante del Municipio de Tibacuy.

PROPIEDAD	Zn	Mn	CE	Ca/Mg	Ca/K	Mg/K	(Ca+Mg)/K	Arena	Arcilla	Limo
	mg kg ⁻¹		dS m ⁻¹	Relaciones de cationes				%		
Mínimo	0,10	3,11	0,08	0,59	6,18	4,58	10,77	16,05	17,45	14,63
Máximo	7,60	43,13	0,73	4,45	101,79	42,55	128,93	67,83	48,32	44,10
Promedio	1,61	19,21	0,23	1,78	35,14	21,09	56,23	43,51	30,76	25,73
Mediana	1,14	18,80	0,19	1,40	33,53	20,96	55,94	45,09	29,61	25,66
Desviación estándar	1,67	11,66	0,14	0,88	21,68	10,99	29,60	11,68	6,85	7,23
Asimetría	1,70	0,27	1,65	1,23	1,00	0,25	0,42	-0,19	0,48	0,79

Fuente: elaboración propia.

La caracterización fisicoquímica de suelos de la Finca el porvenir presenta un pH de 5,55 que según Fassbender (1982) es moderadamente ácido, el pH está relacionado directamente con el Sodio (Na) y el Aluminio intercambiable (Al) que reportan valores bajos y óptimos de 0,11 y 0,05 cmol/kg y con el Calcio que también presenta un valor optimo alto con 6,86 cmol/Kg. La Materia Orgánica presenta un valor de 2,37% encontrándose en el rango optimo, sin embargo, se debe mantener mediante la aplicación de abonos orgánicos descompuestos. En cuanto a los elementos mayores se presentaron los siguientes resultados Nitrógeno total con un valor de 0,07%, Fosforo (P) con 2,68 mg kg⁻¹ y Potasio (K) con 0,18 cmol/kg todos encontrándose en niveles bajos, en el caso del nitrógeno, este elemento puede suplirse aplicando materia orgánica al suelo o por medio de fertilizantes químicos; para el caso del fósforo y el potasio se aplican al suelo en forma de fertilizantes (Jaramillo,2002), también se puede

recurrir para el caso del fosforo a la adición de micorrizas para mejorar la absorción del fosforo disponible (Burbano (1989) y Sánchez (1999).

La CE vario de 0,08 dS/ma 0,73 dS/m con una mediana de 0,19 dS/m indicando suelos sin restricción de uso (Corrales, 2002).

Para el Magnesio se obtuvo un valor alto de 3,99 cmol/kg encontrándose por encima del rango óptimo para cítricos (Corrales, 2002), de la misma forma el Hierro (Fe) obtuvo un valor de 73,83 mg/kg al igual que el Cobre (Cu) que coincide con las concentraciones excesivas encontradas por Maldonado et al en el 2007.

Dependencia espacial.

La cuantificación de la dependencia espacial se realizó mediante el software RStudio, específicamente usando la librería spdep (Bivand et al., 2015). En la Tabla 4 se observan los índices de moran generados.

Variable	I. Moran	Moran (p value)
pH	0,017	0,151
COS	0,031	6,51E-02
MO	0,031	6,51E-02
S	0,000	0,281
P	0,071	1,87E-04
Ca	0,012	0,191
Mg	0,006	0,242
K	-0,021	0,679
Na	0,024	9,54E-02
Al + H	0,012	0,144
CICE	0,010	0,210
Cu	-0,066	0,292
Fe	-0,004	0,331
Zn	0,120	2,05E-06
Mn	0,024	0,101
CE	0,000	0,295
Ca/Mg	-0,001	0,322
Ca/K	0,056	8,15E-03
Mg/K	0,012	0,189
(Ca+Mg)/K	0,055	1,13E-02
Arena	-0,063	0,419
Arcilla	-0,051	0,630

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Medidas de dependencia espacial para el municipio de Tibacuy

En el área de estudio se identificaron 6 propiedades fisicoquímicas que presentan autocorrelación positiva (COS, P, Na, Zn, y las relaciones Ca/K y (Ca+Mg)/K) donde el p-value, corresponde a un valor menor a 0,05, variables para las cuales se generaron mapas nutricionales.

Índices multiespectrales de suelo

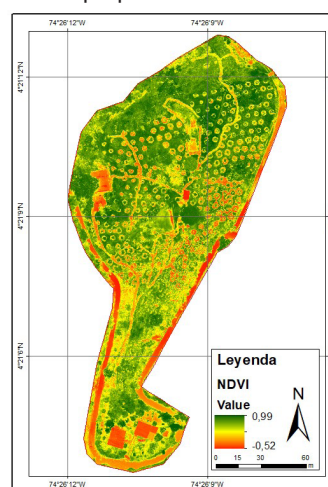
El NDVI es un índice muy aceptable que nos da información muy valiosa porque podemos generar mapas que nos dan diferencias de vigor

vegetativo en grandes extensiones. Una vez analizado, debemos ir a campo, observar las diferencias (tanto espaciales como temporales) de las zonas afectadas y empezar a descartar variables y buscar el diagnóstico concreto. El NDVI es una herramienta más, no una solución.

El NDVI no le dará al agricultor una respuesta sobre qué sucedió exactamente con su cultivo; puede existir docenas de razones por las que las plantas se están marchitando: deficiencias nutricionales, enfermedades, plagas, daños por mecanización, alteraciones del riego, etc. Sin duda el NDVI es una herramienta más de apoyo al diagnóstico y la predicción de los problemas presentes en su sistema productivo. El NDVI permite examinar áreas problemáticas específicas, lo que les ayuda a definir problemas de manera más efectiva en lugar de gastar tiempo y recursos merodeando por todo el campo en busca de respuestas (Tsiart et al., 2021)

En general valores cercanos a cero se relacionan con problemas en fertilización y valores cercanos a uno con plantas sanas. En la figura 3 colores rojos sugieren que en esas zonas podrían existir deficiencias nutricionales.

Figura 3. Índices NVDI determinado para el municipio de Tibacuy. Elaboración propia.



Fuente: elaboración propia.

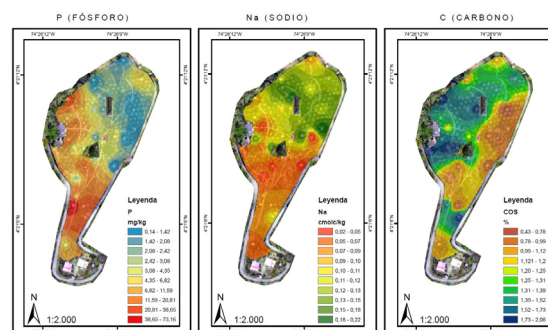
El índice da una imagen completa del contenido de clorofila, que es uno de los principales indicadores de nitrógeno y ayuda a generar mapas de variabilidad espacial con posibles áreas de deficiencias nutricionales donde posiblemente sea necesario realizar algún ajuste con fertilización.

El área de estudio presenta valores de NVDI entre 0,99 y -0,52 en una escala donde el uno (1) equivale al valor más alto; los sitios de plantas de limón en su mayoría se observan de color verde con borde rojo atribuido a suelo desnudo por deshierba del plato de la planta, la predominancia del color verde permite inferir que el cultivo tiene una alta tasa fotosintética y en efecto poseen una productividad alta; el NVDI presenta una correlación positiva con el mapa de distribución del Carbono (figura 3), asociada con la materia orgánica siendo su componente principal, un alto contenido en materia orgánica proporciona nutrientes a las plantas y mejora la disponibilidad de agua, lo cual mejora la fertilidad del suelo y, en definitiva, mejora la productividad de los alimentos (FAO, 2017), estos resultados permiten inferir que en las zonas de NDVI con valores bajos se deben realizar prácticas asociadas al incremento del uso de abonos orgánicos para obtener una mayor productividad en los cultivos..

Generación de mapas de distribución de nutrientes

En la Figura 4, se presenta algunos mapas nutricionales del municipio de Tibacuy, específicamente a los elementos P (Fósforo), Na (Sodio) y al C (Carbono). Para el caso del elemento Zn (Zinc) y para algunas razones de cambio entre algunos elementos ([Ca/K] y [Ca+Mg/K]), las cuales presentan una dependencia espacial. Por esta razón se debe realizar una división espacial en unidades de manejo para ajustar la fertilización.

Figura 4. Mapas nutricionales para el área productiva de Tibacuy. Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES

- La correlación de las variables físico-químicas con los índices multispectrales es un insumo para realizar planes de fertilización ajustados que permitan corregir y suplir las necesidades nutricionales del cultivo.
- Los análisis estadísticos generados están basados en métodos ya probados y son ejecutados en programas de información geográfica permitiendo aplicar la tecnología y el uso de Drones para la toma de decisiones en campo.
- La vinculación de productores al proyecto es fundamental para la transferencia de la investigación ya que se plantea una segunda fase del proyecto en donde se aplicará los fertilizantes y se evaluará el impacto en la producción del limón.
- Para el análisis de variables se tomó como valor base la mediana, dado que es una medida de tendencia central que no es afectada por valores extremos o atípicos como lo es la media (Rienzo et al, 2005), a fin de disminuir la influencia de la variabilidad espacial y temporal asociada a todos los aspectos de la producción agrícola.
- El uso de mapas con datos espaciales de nutrientes y propiedades del suelo junto con índices de vegetación como NDVI e interpretación de datos permite la identificación de

unidades de manejo y aplicación de prácticas viables y sostenibles para el productor.

- Se recomienda una segunda fase del proyecto para evaluar la aplicación de plan de nutrición frente a variables agronómicas y de producción del cultivo, para comprobar la veracidad del modelo.

Referencias

- Bivand, R., Altman, M., Anselin, L., Assunção, R., Berke, O., Bernat, A., & Blanchet, G. (2015). Package 'spdep': The Comprehensive R Archive Network. <https://cran.microsoft.com/snapshot/2017-09-17/web/packages/spdep/spdep.pdf>
- Bongiovanni, R., Mantovani, E., Best, S., & Roel, Á. (2006). Agricultura de precisión: integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Procisur/IICA.
- Burbano, OH. 1989. El suelo: una visión sobre sus componentes biogénicos. Universidad de Nariño. Pasto (Colombia).
- Claret M, Best S, León L. 2006. 2.1. Sistema de posicionamiento global (GPS). En: Bongiovanni R, Chartuni Mantovani E, Best S, Roel A, editores. Agricultura de precisión: integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Uruguay: [PROCISUR] Programa Cooperativo para el Desarrollo Tecnológico Agroalimentario y Agroindustrial del Cono Sur. p. 25- 37. ISBN: 92-9039-741-1
- Corrales A. 2002. Manual ilustrado para la producción de cítricos en Colombia. Bogotá: MADR, Asocítricos, FNHF.
- Di Rienzo, J. A. (2005). Estadísticas para las ciencias agropecuarias. Editorial Brujas.
- DJI. (2017). Phantom 4 Pro/Pro+ User Manual. Available online: https://dl.djicdn.com/downloads/phantom_4_pro/20170719/Phantom_4_Pro_Pro_Plus_User_Manual_ES.pdf
- Mavic 2 Enterprise. Available online: <https://www.dji.com/mavic-2-enterprise-advanced>. (accessed on 01 October 2021).
- FAO. 2017. Carbono Orgánico del Suelo: el potencial oculto. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura Roma, Italia
- Fassbender, H. 1982. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), San José, Costa Rica. 398 p.
- Jaramillo Jaramillo, D. F. (2002). Introducción a la Ciencia del Suelo. Medellín, Colombia: Jaramillo Jaramillo, Daniel Francisco
- IICA Y PROCISUR (2014). Manual de agricultura de precisión /, PROCISUR – Montevideo. 176 p
- IGAC. (2018). Etapa de campo para levantamiento de suelos. Subdirección de Agrología. Bogotá, D.C. 31 p. Disponible en: <http://igacnet2.igac.gov.co/intranet/UserFiles/File/procedimientos/procedimientos%202008/2017/I40100-09%2017V4%20Etapa%20de%20campo%20para%20levantamiento%20de%20suelos.pdf>
- Fassbender, H. 1982. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), San José, Costa Rica. 398 p
- Fu, W. J., Jiang, P. K., Zhou, G. M., & Zhao, K. L. (2014). Using Moran's I and GIS to study the spatial pattern of forest litter carbon density in a subtropical region of southeastern China. Biogeosciences, 11(8), 2401-2409. <https://doi.org/10.5194/bg-11-2401-2014>
- Giraldo, R. (2002). Introducción a la geoestadística: Teoría y aplicación. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- González, L. y Tullo, C (2019). Guía técnica cultivo de cítricos. San Lorenzo, Paraguay : FCA, UNA. 80 p.
- Krige, D. G. (1951). A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 52(6), 119-139. https://hdl.handle.net/10520/AJA0038223X_4792
- Lowenberg-DeBoer, J. M., & Erickson, B. (2019). Setting the record straight on precision agriculture adoption. Agronomy Journal. <https://doi.org/10.2134/ agronj2018.12.0779>
- Maldonado, T. R. G.; Almaguer, V. M. E.; Álvarez, S. E. y Robledo S. 2008. Diagnóstico nutrimental y validación de dosis de fertilización para limón persa. Terra Latinoam. 26(4):341-349.
- Minasny, B., & McBratney, A. B. (2006). A conditioned Latin hypercube method for sampling in the presen-

- ce of ancillary information. *Computers & geosciences*, 32(9), 1378-1388. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2005.12.009>
- Moeyes, J. (2018). The soil texture wizard: R functions for plotting, classifying, transforming and exploring soil texture data. CRAN. R-Project. <https://cran.r-project.org/web/packages/soiltexture/index.html#0020>
- NRCS, U. (2014). Official soil series descriptions. Natural Resources Conservation Service, United States Department of Agriculture. <http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/class>.
- Parrot, Parrot Sequoia Application Notes. Available online: <https://forum.developer.parrot.com/t/parrot-announcement-release-of-application-notes/5455> (accessed on 10 February 2020).
- Pebesma, E. J. (2004). Multivariable geostatistics in S: the gstat package. *Computers & geosciences*, 30(7), 683-691. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2004.03.012>
- Sánchez de P, M. 1999. Endomicorizas en agroecosistemas colombianos. Universidad Nacional de Colombia. Palmira (Colombia). 227p.
- Schloerke, B., Crowley, J., & Cook, D. (2018). Package 'GGally'. <https://mran.microsoft.com/snapshots/2016-10-05/web/packages/GGally/GGally.pdf>
- Staff, S. S. (2014). Keys to Soil Taxonomy, 12th Edn Washington. DC: Natural Resources Conservation Service, United States Department of Agriculture. https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/class/taxonomy/?cid=nrcs142p2_053580
- Tsibart, A., Postelmans, A., Dillen, J., Elsen, A., Vandendriessche, H., Van De Ven, G., & Saeys, W. (2021). Deriving application maps for precision fertilization from soil scans and historical NDVI maps. In *Precision agriculture'21* (p. 278). Wageningen Academic Publishers. https://doi.org/10.3920/978-90-8686-916-9_73
- Wickham, H. (2011). ggplot2. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 3(2), 180-185. <https://doi.org/10.1002/wics.147>