

**Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano**  
**Departamento de Ciencia y Producción Agropecuaria**  
**Ingeniería Agronómica**



Proyecto Especial de Graduación

**Duración del efecto del subsoleo en la calidad del suelo y la producción de  
pasturas evaluados con imágenes multiespectrales de satélite**

Estudiantes

Luis Carlos Balcárcel Gálvez

Verónica Lisbeth Moreno Almanza

Asesoras

Gloria Elizabeth Arévalo Valderrama, Dra.

Marielena Moncada Laínez, Ph.D.

Honduras, julio de 2022

**Autoridades**

**TANYA MÜLLER GARCÍA**

Rectora

**ANA M. MAIER ACOSTA**

Vicepresidenta y Decana Académica

**CELIA O. TREJO RAMOS**

Directora del Departamento de Ciencia y Producción Agropecuaria

**HUGO ZAVALA MEMBREÑO**

Secretario General

## Contenido

Índice de Cuadros.....	5
Índice de Figuras .....	7
Índice de Anexos.....	9
Resumen .....	10
Abstract.....	11
Introducción.....	12
Materiales y Métodos.....	17
Ubicación del Estudio.....	17
Selección de Lotes.....	17
Evaluación de Suelos en Cada Lote.....	17
Variables Determinadas.....	21
En el suelo .....	21
Índices Espectrales de Biomasa .....	22
Resultados y Discusión.....	27
Análisis Físico y pH de los Suelos para el Lote de Vaquillas.....	27
Análisis Físico y pH de los Suelos para el Lote de La L .....	29
Análisis Físico y pH de los Suelos para el Lote de Zorrales 6 y Los Mingos.....	31
Análisis de Índices Espectrales para el Lote de Vaquillas, Unidad Ganado Lechero, en los Años 2018-2021. ....	33
Análisis de Índices Espectrales para el Lote La L, Unidad Ganado de Carne, 2018-2021 .....	35
Análisis de Índices Espectrales para los Lotes de Zorrales 6 y Los Mingos, EAP, Zamorano, 2018-2021 .....	37
Correlación entre las Variables Físicas y pH del Suelo y Variables Espectrales .....	42
Conclusiones .....	44

Recomendaciones.....45

Referencias.....46

## Índice de Cuadros

Cuadro 1 Descripción de los tratamientos y lugar de lotes según su adecuación para determinar el efecto del subsoleo en las propiedades físicas del suelo y producción de pasturas en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano.....	18
Cuadro 2 Valores para interpretar rangos de pH en el suelo .....	22
Cuadro 3 Valores para interpretar el índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). .....	24
Cuadro 4 Valores para interpretar cobertura y estrés hídrico en el índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). .....	25
Cuadro 5 Efecto adecuación del suelo tres años posterior al subsoleo, en tres horizontes, Lote Vaquillas, Unidad de Ganado de Lechero, Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras. ....	27
Cuadro 6 Efecto adecuación del suelo seis años posteriores al subsoleo, en tres horizontes, Lote La "L", Unidad de Ganado de Carne, Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras. ....	30
Cuadro 7 Efecto adecuación del suelo doce años posterior al subsoleo, en tres horizontes, subsolado (Lote Zorrales 6) vs no subsolado (Lote Los Mingos), Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras.....	32
Cuadro 8 Índices espectrales para cada tratamiento con subsoleo y sin subsoleo, en los meses de junio a diciembre en los años 2018-2021. Lote Vaquillas, Unidad de Ganado Lechero, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano Honduras. ....	34
Cuadro 9 Índices espectrales para cada tratamiento para cada tratamiento con subsoleo y sin subsoleo, en los meses de junio a diciembre desde el año 2018-2021. Lote La L, Unidad de Ganado de Carne, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano Honduras. ....	36
Cuadro 10 Evaluación de los tres diferentes índices espectrales para cada tratamiento con subsoleo (Zorrales 6) y sin subsoleo (Los Mingos), en los meses de junio a diciembre desde el año 2018-2021, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano Honduras. ....	38

Cuadro 11 Correlación de Pearson entre variables físicas y pH del suelo y variables espectrales determinadas en áreas de pastoreo en los terrenos de producción ganadera en Zamorano, Honduras.

.....42

## Índice de Figuras

Figura 1 Áreas de estudio para la evaluación de la duración del efecto del subsoleo en la calidad del suelo y la producción de pasturas en lotes pecuarios, en la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras.....	19
Figura 2 Ubicación del Lote de Vaquillas, Unidad de Ganado Lechero, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. ....	19
Figura 3 Ubicación de calicatas del Lote La L, (área rojo-subsolado) (área amarilla- sin subsoleo), Unidad de Ganado de Carne, Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras. ....	20
Figura 4 Ubicación de calicatas del Lote Zorrales 6 (área amarilla- subsolado), Unidad de Ganado de lechero y Los Mingos (área roja - sin subsoleo), Unidad de Ganado de Carne, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. ....	20
Figura 5 Diagrama de flujo de las actividades desarrolladas para la determinación de la duración del efecto del subsoleo en la calidad del suelo y la producción de pasturas, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano.....	26
Figura 6 Diagrama de flujo de las actividades desarrolladas para la determinación de la duración del efecto del subsoleo en la producción de pasturas mediante el uso de imágenes multiespectrales de satélites, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano.....	26
Figura 7 Mapas para el lote de Vaquillas, Unidad de Ganado lechero, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Comportamiento de la vegetación para los lotes con subsoleo y sin subsoleo para el mes de septiembre de 2021. ....	39
Figura 8 Mapas para el Lote de La L, Unidad de Ganado de Carne, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Comportamiento de la vegetación para los lotes con subsoleo y sin subsoleo para el mes de septiembre de 2021. ....	40

Figura 9 Mapas para el Lote Zorrales 6 (subsulado) vs lote Los Mingos (no subsulado), Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras. Comportamiento de la vegetación para los lotes con subsoleo y sin subsoleo para el mes de septiembre de 2021.....41



## Índice de Anexos

Anexo A Coordenadas de calicatas para cada lote evaluado .....	52
Anexo B Datos de precipitación de los años 2018 a 2022 (junio), estación meteorológica Zorrales 6, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras .....	53
Anexo C Calicata lote de Vaquillas, Unidad de Ganado de Leche, área El Salvador (subsulado) .....	54
Anexo D Calicata lote de Vaquillas, Unidad de Ganado de Leche, área Honduras (sin subsoleo) .....	55
Anexo E Calicatas lote La "L", Unidad de Ganado de Carne, área subsolada .....	56
Anexo F Calicatas lote La "L", Unidad de Ganado de Carne, área subsolada .....	57
Anexo G Calicata lote La "L", Unidad de Ganado de Carne, área subsolada .....	58
Anexo H Calicata lote La "L", Unidad de Ganado de Carne, área subsolada .....	59
Anexo I Calicata lote lote Zorrales 6, Unidad de Ganado Lechero, área subsolada .....	60
Anexo J Calicata lote lote Zorrales 6, Unidad de Ganado lechero, área subsolada.....	61
Anexo K Calicata lote Zorrales 6, Unidad de Ganado lechero, área subsolada .....	62
Anexo L Calicata lote lote La L, Unidad de Ganado de Carne, área sin subsoleo .....	63
Anexo M Calicata lote lote La L, Unidad de Ganado de Carne, área sin subsoleo.....	64
Anexo N Calicata lote Los Mingos, Unidad de Ganado de Carne, área sin subsole.....	65
Anexo O Calicata lote Los Mingos, Unidad de Ganado de Carne, sin subsoleo.....	66
Anexo P Procedimiento de estimación de clases texturales con densímetro (método de Bouyoucos) .....	68
Anexo Q Método de estimación de estabilidad de los agregados.....	69
Anexo R Método de la probeta para estimación de (densidad aparente, densidad real y porosidad)	70

## Resumen

La degradación de suelos por prácticas inadecuadas es uno de los principales problemas de la agricultura. La compactación del suelo por el pisoteo del ganado lo degrada físicamente y disminuye productividad y rendimientos de las pasturas. Se recomiendan enmiendas como subsolar y nuevas tecnologías para evaluar la calidad de los pastos como imágenes multiespectrales de satélites. Los objetivos de fueron: evaluar propiedades físicas del suelo y pH con y sin subsoleo, determinar el efecto del subsoleo años después de realizado y el efecto de adecuar suelos mediante subsoleo en la producción de pasturas con imágenes multiespectrales. Para estimar el desarrollo y nivel hídrico de los pastos se analizaron imágenes multiespectrales, usando índices de vegetación (NDVI, NDMI, SAVI). Se realizó separación de medias (Duncan) y análisis de correlación de Pearson entre variables espectrales y suelos. Subsolar el suelo mejora su condición física y pH a la profundidad del subsolador y se mantiene por lo menos tres años posterior a su ejecución. Transcurrido más tiempo (6 y 12 años) se mantiene efecto de subsolar en algunas propiedades como densidad aparente y porosidad en el segundo horizonte. Las imágenes multiespectrales de satélite son una herramienta para evaluar el estado de la vegetación y su calidad (NDVI y SAVI), el estrés hídrico y contenido de humedad (NDMI) y el efecto del subsoleo. NDMI fue el mejor índice para evaluar este efecto hasta cuatro años posteriores a subsolar. En ocho años, aunque puede mostrar un efecto diferencial, no es claro atribuirlo al subsoleo.

*Palabras clave:* agricultura de precisión, compactación, índices de vegetación, pasturas, subsoleo.

### **Abstract**

Soil degradation due to inappropriate practices is one of the main problems in agriculture. The compaction of the soil by the trampling of livestock apparently degrades it and decreases the productivity and yields of pastures. Amendments such as subsoiling and new technologies to assess pasture quality such as multispectral satellite images are recommended. The objectives were: to evaluate the physical soil properties and pH with and without subsoiling, to determine the effect of subsoiling years after carrying out, and the effect of adapting soils through subsoiling on pasture production with multispectral images. To estimate the development and water level of the pastures, multispectral images were analyzed using vegetation indices (NDVI, NDMI, SAVI). Mean separation (Duncan) and Pearson connection analysis between spectral variables and soils were performed. Subsoiling the soil improves its physical condition and pH at a depth of the subsoiler and is maintained for at least three years after its execution. After 6 to 12 years the effect of subsoiling is maintained in some properties such as bulk density and porosity in the second horizon. Satellite multispectral images are a tool to assess the vegetation condition and its quality (NDVI and SAVI), water stress and moisture content (NDMI), and the effect of subsoiling. NDMI was the best index to evaluate this effect up to four years after a subsoiling. In eight years, although it may show a differential effect, it is not clear to attribute it to the subsoil.

*Keywords:* compaction, grazing, precision farming, subsoil, vegetation indices.

## Introducción

El suelo constituye la base para el desarrollo sostenible de la agricultura. Este aporta servicios ecosistémicos, seguridad alimentaria y permite llevar a cabo actividades de producción agrícola (FAO 2015). Es un recurso natural no renovable que se forma por el fenómeno de la meteorización que es producido por efectos físicos, químicos y biológicos (Aristizábal et al. 2011). Es por eso que los nutrientes del suelo se agotan más rápido de lo que se regeneran, lo que provoca que el suelo sea cada vez menos fértil, contaminado y degradado (FAO 2018).

La importancia del recurso suelo es debida a que de su condición depende la productividad, salud de los cultivos y animales. Existe una correlación directa entre la nutrición del ganado y la composición del suelo. Es por eso que, si se tiene un adecuado crecimiento vegetativo del forraje, se tendrá como resultado un hato sin deficiencias nutricionales (Sánchez 2007).

Entre los problemas de degradación física del suelo, la compactación es uno de los principales, debido a que causa una disminución en los rendimientos de producción. La compactación se puede dar por diversas actividades, una de ellas es el pisoteo de los animales en el proceso de pastoreo, lo cual afecta el hábitat de los microorganismos del suelo y la productividad de las pasturas (Medina 2016).

La compactación producida por el pisoteo animal depende del contenido de humedad a la que se encuentre el suelo en el momento de pastoreo. Los suelos que se pastorean en estado seco tienden a tener una probabilidad mínima de daño estructural. Por otro lado, al pastorear con un alto contenido de humedad estos están sujetos a sufrir un mayor grado de compactación. Esta compactación se reflejará en los primeros centímetros del suelo teniendo como consecuencia una disminución en la macro porosidad, menor aireación, menor infiltración, aumentos en la densidad aparente, resistencia superficial, y presencia de agregados indeseables en el suelo (Taboada 2007).

Con el subsolado se busca mejorar la condición física del suelo. Este implemento ayuda a disminuir la compactación y romper los agregados del suelo haciéndolos de un menor tamaño

permitiendo que las plantas puedan desarrollar un mejor sistema radicular que les favorece tener una nutrición adecuada (Vistoso y Martínez 2020). Con la evaluación del subsoleo se determina la eficiencia y su funcionalidad para mejorar la calidad del suelo con el objetivo de aumentar la producción de biomasa y salud de los pastos.

Los pastos son una buena fuente de alimento porque ofrecen los nutrientes necesarios para el buen desempeño animal, presenta bajos costos de producción y satisface las demandas de la población en alimentos esenciales como leche y carne (León et al. 2018). La fuerte degradación de los pastizales se debe a diferentes causas como factores ambientales, tecnológicos y socioeconómicos. Debido a que su consumo es alto en sistemas ganaderos, se busca rehabilitar las pasturas degradadas para incrementar la productividad y sostenibilidad con ayuda de nuevas tecnologías (Hilario 2014).

La agricultura de precisión a través de la teledetección ofrece información esencial sobre la variabilidad de las cubiertas vegetales. Estas estiman parámetros biofísicos de la vegetación como el contenido de humedad, cantidad de clorofila, vigor y estrés hídrico de la planta (Cáceres et al. 2012). La teledetección tiene como objetivo identificar componentes de la superficie terrestre. Estos emiten y reflejan la radiación del espectro electromagnético, obteniendo imágenes proporcionadas por distintas bandas de colores del espectro con la finalidad de entender los procesos que ocurren en la corteza terrestre. De esta manera, se adquiere más información del área de estudio lo que permite minimizar costos, controlar y optimizar ciclos de producción para el crecimiento de una agricultura sostenible (Hernández et al. 2014).

La vegetación tiene la característica de tener pigmentos en sus células, estas capturan diferentes ondas del espectro electromagnético, utilizadas en la producción de energía de la fase luminosa de la fotosíntesis, mediante la banda azul (430nm) y roja (600nm) que son las más absorbidas por las plantas, por el contrario, la banda del infrarrojo cercano NIR (750-1100 nm) son las menos absorbidas y las más reflejadas, la reflexión ocurre en el momento en que las bandas chocan con una

superficie y vuelven al objeto del que fueron emitidas dispersándose en el espacio hasta que son captadas por otro medio (Labrador et al. 2012).

El contenido de humedad, salud y calidad de la vegetación se ha determinado a partir de muestreos en campo y análisis de laboratorio, lo que resulta costoso y conlleva mucho tiempo. Las imágenes satelitales brindan una solución, a través de diferentes bandas espectrales ofrecen información del espectro electromagnético, por medio de los índices de vegetación recopilados y analizados se obtienen datos tan precisos como los de laboratorio (Cáceres et al. 2012).

A través de imágenes satelitales se logra obtener indicadores como el Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI) que es un indicador de biomasa fotosintéticamente activo que muestra tipos de cobertura del suelo y su estado general (Toribio 2019). El NDVI detecta la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación, con base a la medida de la intensidad de la radiación de bandas del espectro electromagnético que la vegetación emite o refleja (Alonso 2015).

El Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI), fue recomendado por Huete (1988), para ampliar los límites de NDVI donde se encuentren zonas con suelos desnudos. Por lo tanto, los datos arrojados por este índice presentan menos variación debido a que no toma la reflectancia del suelo (Castellanos et al. 2016).

El Índice de Humedad de Diferencia Normalizada (NDMI), es usado para determinar el contenido de humedad, estrés hídrico y condiciones de sequía de los cultivos. Utiliza bandas de infrarrojo cercano (NIR) y el infrarrojo de onda corta (SWIR) (Lastovicka et al. 2020).

En la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, se ha trabajado con diferentes sistemas de subsoleo en lotes conocidos como Vaquillas, La 'L' y Zorrales 6. Estos sistemas tratan de mejorar las condiciones físicas del suelo y la producción de forraje.

El lote de Vaquillas trabajado por Holguín (2020) fue un sistema en "línea clave" el cual es una técnica de subsoleo siguiendo las curvas a nivel usada para la regeneración de agroecosistemas que optimizan el recurso hídrico para restituir la profundidad y fertilidad del suelo. Determinó variaciones

en hidrología superficial y sub-superficial, la eficiencia de la mecanización del suelo y su efecto en el crecimiento del pasto *Panicum maximun cv. Tobiata*. Los resultados de este estudio señalan que los principios de "Línea clave" favorecen la regeneración de pasturas degradadas.

Escalante Nahui (2016), en su estudio en el lote La L, utilizó subsoleo con aditamento de aletas en los cinceles para aumentar el volumen de suelos roturado, la profundidad de los cinceles fue de 0.70m. Concluye que, el aditamento de aletas sí aumenta la eficiencia neta, para suelos con antecedentes de mecanización, como en suelos sin antecedentes. Sin embargo, para que el efecto del subsoleo con aletas tenga resultados superiores se necesitó realizar más de un pase.

Guerra Serrano y Mendieta Servellón (2011), evaluaron el efecto del subsolador en el lote Zorrales 6 anteriormente llamado zorrales 7, Unidad de Ganado Lechero, en la EAP Zamorano. En este estudio el subsoleo se realizó en dos pases de subsolador. El primero a una profundidad de 1.1 metros y separación entre ganchos de 1.20 m. Dada la potencia requerida, la maquinaria utilizada fue un D8. El segundo pase del implemento se realizó a 45° respecto al primero, con un implemento de menor profundidad, con una profundidad de ganchos de 80 cm. Se utilizó un D6 con la potencia para hallar este implemento a la profundidad deseada. Se realizó la evaluación del subsolado al tomar en cuenta la profundidad potencial del suelo vs la profundidad lograda por cada pase y se comparó el efecto del subsoleo antes, cinco y trece meses después. Concluyen que, bajo condiciones de suelos arcillosos masivos, el subsoleo realizado 12 años atrás aumentó la producción de materia seca. Además, incrementó el tamaño de los agregados en el primer horizonte. En el segundo horizonte disminuyó el tamaño de los agregados y las variables físicas como resistencia a la penetración, espacio poroso, color, textura, consistencia, estructura, número de raíces, densidad real y densidad aparente mostraron diferencias significativas a través del tiempo.

Los objetivos de este estudio fueron evaluar el efecto de la adecuación de los suelos mediante subsoleo en las propiedades físicas y el pH de suelos dedicados a la producción de pasturas, determinar el efecto del subsoleo a través del tiempo después de realizado y determinar el efecto de

la adecuación de suelos mediante subsoleo en la producción de pasturas con el uso de imágenes multiespectrales de satelitales.



## **Materiales y Métodos**

### **Ubicación del Estudio**

El estudio se realizó en los meses de febrero a mayo de 2022, en los terrenos de La L, Vaquillas, Los Mingos y Zorrales 6 (anteriormente llamado Zorrales 7) de la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, localizada en el Valle de Yeguaré, Departamento de Francisco Morazán a 30 km al Este de la ciudad de Tegucigalpa, Honduras. La EAP se encuentra localizada a 800 msnm, con precipitación promedio anual de 1100 mm distribuidos en los meses de mayo a octubre y una temperatura promedio de 24°C (Elvir Coello 2016).

### **Selección de Lotes**

La selección de lotes de estudio se realizó con base en trabajos previos donde se evaluó el efecto del subsoleo en áreas agropecuarias de Zamorano. En el estudio se determinaron las propiedades físicas y pH del suelo, se comparó el efecto de áreas subsoladas y no subsoladas en la producción de pasturas.

### **Evaluación de Suelos en Cada Lote**

Se realizaron 15 calicatas en los diferentes lotes para conocer la condición física y química del suelo y el efecto de los tratamientos. Cada calicata tuvo una dimensión de 1.20 m de ancho, x 1.20 m de largo y 0.90 m de profundidad. Cada una de ellas se ubicó dentro de los tratamientos evaluados en años anteriores y en los lotes control. Se realizaron 4 calicatas en el lote de Vaquillas fueron distribuidas, dos en un área subsolada y otras dos en sectores tomados como control (Figura 1), este terreno pertenece a la Unidad de Ganado Lechero (Cuadro 1). El lote La L contó con seis calicatas, cuatro fueron realizadas en el lote subsolado y dos en el lote control (Figura 2). El lote La L pertenece a la Unidad de Ganado de Carne (Cuadro 1). Para el lote de Zorrales 6 (subsolado), se ubicaron según las coordenadas tomadas del estudio Guerra Serrano y Mendieta Servellón (2011). El lote Los Mingos fue tomado como control de Zorrales 6 y en él se describieron otras dos calicatas (Figura 3 y 4). En el (Cuadro 1) se encuentran descripción de ambos lotes. En las calicatas realizadas se describió el número

de horizontes, su profundidad, textura, estructura, porosidad, cantidad y distribución de raíces (FAO 2009). De cada horizonte se tomó una muestra de suelo para luego llevarla al laboratorio y realizar los análisis físicos y químicos.

### Cuadro 1

*Descripción de los tratamientos y lugar de lotes según su adecuación para determinar el efecto del subsoleo en las propiedades físicas del suelo y producción de pasturas en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano.*

Finca	Lote	Área (ha)	Año de adecuación	Sistema de adecuación	Unidad productiva	Pastura	Actividad
Zorrales	#6	7.9	2010	Subsolado	Ganado lechero	<i>Panicum maximun cv. Tobiata.</i>	Pastoreo
Los Mingos		0.7		Sin Subsoleo	Ganado de carne	<i>Panicum maximun cv. Tobiata.</i>	Pastoreo
El Rodeo	La L	5.8	2016	Subsolado	Ganado de carne	<i>Panicum maximun cv. Mombaza</i>	Pastoreo
El Rodeo	La L	3.8		Sin Subsoleo	Ganado de carne	<i>Panicum maximun cv. Mombaza</i>	Pastoreo
Vaquillas	Lote 1 (El Salvador)	0.62	2019	Subsolado	Ganado lechero	<i>Panicum maximun cv. Tobiata.</i>	Pastoreo
Vaquillas	Lote 1 (Honduras)	0.6		Sin Subsoleo	Ganado lechero	<i>Panicum maximun cv. Tobiata.</i>	Pastoreo
Vaquillas	Lote 1 (Guatemala)	0.72		Sin Subsoleo	Ganado lechero	<i>Panicum maximun cv. Tobiata.</i>	Pastoreo

*Nota.* Zorrales 6, anteriormente llamado Zorrales 7.

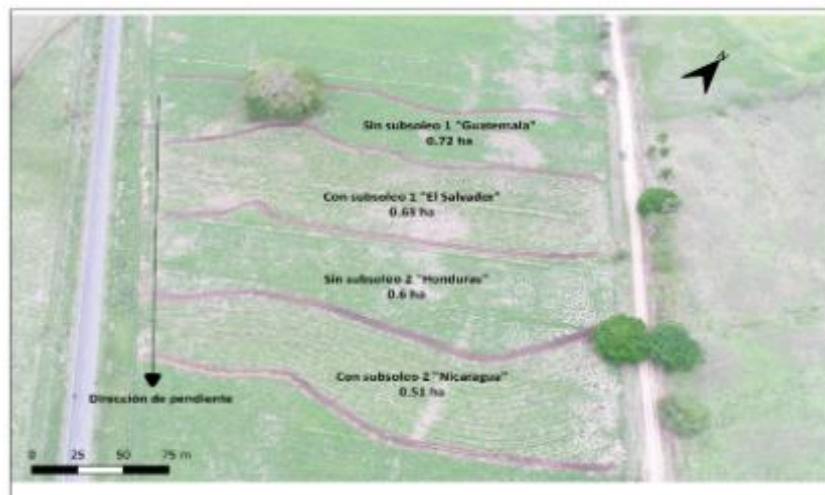
**Figura 1**

*Áreas de estudio para la evaluación de la duración del efecto del subsolado en la calidad del suelo y la producción de pasturas en lotes pecuarios, en la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras.*



**Figura 2**

*Ubicación del Lote de Vaquillas, Unidad de Ganado Lechero, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras.*



Nota. Tomado de Holguín (2020).

**Figura 3**

*Ubicación de calicatas del Lote La L, (área rojo-subsolado) (área amarilla- sin subsoleo), Unidad de Ganado de Carne, Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras.*



**Figura 4**

*Ubicación de calicatas del Lote Zorrales 6 (área amarilla- subsollado), Unidad de Ganado de lechero y Los Mingos (área roja - sin subsollado), Unidad de Ganado de Carne, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras.*



## VARIABLES DETERMINADAS

### En el Suelo

#### Propiedades Físicas.

**Textura.** Se determinó por el método de Bouyoucos (1927) y se expresó en porcentaje de arena, limo y arcilla.

**Densidad Aparente.** Se realizó por el método de la probeta, para realizar este análisis se necesita una muestra de suelo seco sin disturbar. Se usó una probeta de 50 mL, en esta se colocó el suelo hasta llegar aproximadamente a los 20 mL y se pesó su masa inicial, después se agregaron 20 mL de agua para que ocupe el espacio entre los agregados y tomar el volumen. Posteriormente se determinó la densidad aparente con una relación peso-volumen [ecuación 1].

$$D_{ap} = \frac{\text{Peso del suelo seco}}{\text{Volumen aparente del suelo}} \quad [1]$$

Nota. Tomado de Arévalo y Gauggel (2020).

**Porosidad.** La porosidad del suelo se determinó de forma indirecta a partir de la densidad aparente y densidad real [ecuación 2]. Para esto se debe conocer previamente estos valores los cuales fueron tomados por el método de la probeta para posteriormente aplicar la ecuación de porosidad.

$$\%EP = 100 - \frac{\text{densidad aparente} \times 100}{\text{densidad real}} \quad [2]$$

Nota. Tomada de Arévalo y Gauggel (2020).

**Abundancia de Raíces.** Se determinó con base a la descripción de calicata en campo, midiendo la distribución y densidad de raíces por horizonte. La cantidad de raíces es categorizada en abundantes, frecuentes, pocas y ausentes. Estas tomaron un valor de rangos numéricos de 4 a 1, siendo cuatro el valor que indica abundante cantidad de raíces y uno ausencia de raíces (Gauggel et al. 2009).











**Estabilidad Estructural de los Agregados.** Para realizar este análisis se utilizó el kit de estabilidad de los agregados mediante el Test de Slake (Herrick et al. 2001). De esa manera se clasificó

los suelos por el grado de estabilidad que presentaron al momento de realizar las pruebas. Se tomó una escala de referencia de uno a seis, donde se señaló que mientras mayor es el número, más estable es su estructura. Se seleccionó un agregado al azar con un diámetro aproximado de seis a ocho milímetros para que pueda ser colocado dentro del tamiz. Posteriormente, se pesa la muestra junto al tamiz en una balanza analítica, luego, se coloca dentro del kit con agua destilada por 5 minutos y se procede a realizar cinco inmersiones, donde, dependiendo de la cantidad y velocidad a la cual se perdió el suelo, poder clasificarlo. Una vez de llevar a cabo este procedimiento, se seca el suelo a 60°C durante 24 horas. Ya secas las muestras, se toma el peso final para establecerlo en porcentajes y poder determinar la estabilidad de los agregados.

**pH.** Se determinó por el método del potenciómetro con electrodos de vidrio. Se pesó 10 g de suelos y se agregó en 10 mL de agua. Luego de 60 minutos de reposo se leyó el pH (Soil and Plant Analysis Council, Inc. 1999).

## Cuadro 2

*Valores para interpretar rangos de pH en el suelo*

pH	Interpretación	
<4.5	Extremadamente ácido	
4.6 - 5.0	Muy fuertemente ácido	
5.1 - 5.5	Fuertemente ácido	
5.6 - 6.0	Moderadamente ácido	
6.1 - 6.5	Ligeramente ácido	
6.6 - 7.3	Neutro	
7.4 - 7.8	Ligeramente alcalino	
7.9 - 8.4	Moderadamente alcalino	
8.5 - 9.0	Fuertemente alcalino	
>9.1	Muy fuertemente alcalino	

*Nota.* Tomado de (Osorio 2012)

## **Índices Espectrales de Biomasa**

### **Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).**

Este índice presenta escalas lineales de medición, que van de -1 a 1. Los valores negativos representan superficies sin vegetación, cercanos a 1 muestran vigorosidad de la vegetación y los

valores de 0 ausencia de vegetación (Cuadro 3) (Muñoz Aguayo 2013). Este fue obtenido a través de las longitudes de onda del espectro infrarrojo cercano (NIR, siglas en inglés) y la onda del espectro rojo (RED, sigla en inglés) [ecuación 3].

$$NDVI = \frac{(NIR-RED)}{NIR+RED} [3]$$

**Cuadro 3**

*Valores para interpretar el índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).*

NDVI				
-1 - -0.8	0.1 - 0.2	0.2 - 0.4	0.4 - 0.6	0.6 - 0.8
Superficies de agua, estructuras artificiales, rocas, nubes y nieve.	Suelos desnudos	Vegetación escasa	Vegetación moderada	Vegetación densa

*Nota.* Adaptado de Toribio (2019)

**Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI).**

Se calculó como una relación entre longitudes de ondas igual que a las de NDVI, espectro infrarrojo cercano (NIR, siglas en inglés) y la onda del espectro rojo (RED, sigla en inglés) con una función L inductiva aplicada para maximizar la reducción de los efectos del suelo en la señal de la vegetación [ecuación 4] (CONAE 2016). Al igual que el NDVI, presenta los mismos valores de interpretación de -1 a 1. Los valores para densidades muy bajas (0.25), intermedias (0.5) y altas de vegetación son (1.0).

$$SAVI: \frac{(NIR-RED)}{(NIR+RED+L) \times (1+L)} \quad [4]$$

**Índice de Humedad de Diferencia Normalizada (NDMI)**

Los valores de este índice varían entre -1 a 1 y van a depender del suelo y del cultivo. Valores inferiores a -1 representan suelos desnudos, valores medios (0) representa una cubierta con estrés hídrico medio, y superior a 1 representan un alto contenido de humedad (Cuadro 4) (Martínez 2019). Se calcula al utilizar las bandas espectrales NIR y la del infrarrojo de onda corta (SWIR, siglas en inglés) [ecuación 5]. Este índice puede detectar el contenido de agua de la vegetación por su reflectancia en las propiedades de la vegetación verde, vegetación seca y de la influencia de los gases presentes en la atmosfera (Gao 1996).

$$NDMI = \frac{(NIR-SWIR)}{NIR+SWIR} \quad [5]$$



**Cuadro 4**

*Valores para interpretar cobertura y estrés hídrico en el índice de Vegetación de Diferencia*

*Normalizada (NDVI).*

NDMI									
-1 -0.8	-0.8 -0.6	-0.6 -0.4	-0.4 -0.2	-0.2 - 0	0 - 0.2	0.2 - 0.4	0.4 - 0.6	0.6 - 0.8	0.8 - 1
Suelo desnudo	Casi inexistente	Muy baja	Baja y seca	Media-baja.	Medi-a-baja	Media-alta	Alta	Muy alta	Cobertura total
				Alto estrés hídrico alto	Alto estrés hídricos hídrico	Alto estrés hídrico	Sin estrés hídrico	Sin estrés hídrico	Sin estrés hídrico/anegamiento

*Nota.* Adaptado de Jackson et al. (2004)

**Diseño Experimental y Análisis Estadístico**

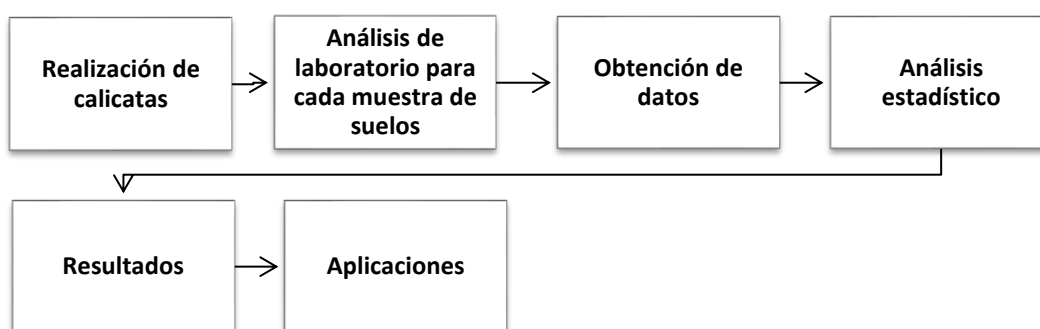
En esta investigación se realizó un diseño de muestras independientes, donde se evaluaron dos tratamientos. Además, incorporó variables físicas y pH de suelos para conocer las diferencias entre los sitios de estudio (Figura 5) y el análisis de imágenes multiespectrales de satelitales para conocer el comportamiento de la biomasa. Las imágenes multiespectrales fueron obtenidas desde el año 2018 de las bases de datos del programa Copernicus, el cual ofrece datos de manera operacional y servicios de información de manera gratuita, brindado por la Unión Europea. Copernicus trabaja a través de satélites Sentinel el cual ofrece datos alta calidad que permite hacer evaluaciones periódicas, monitorización, desarrollo de los cultivos y sobre todo apoyo a las prácticas agrícolas sostenibles (Unión Europea 2015).

Estas imágenes multiespectrales fueron procesadas mediante el software QGIS para poder calcular las variables de biomasa las cuales corresponden a los índices de vegetación NDVI, NDMI Y SAVI, de esta manera analizar su comportamiento. La estimación de los datos de los índices se realizó por un promedio de los datos arrojados por el satélite en el mes, la cantidad de datos variaba por la cantidad de veces que el satélite orbitaba por zona durante el mes y el porcentaje de nubosidad. Estos datos se promediaron teniendo un dato mensual sobre el comportamiento de la vegetación para cada

índice (Figura 6). Los datos para las variables de suelos se analizaron estadísticamente por medio de una prueba "t" de student para todas las variables con el software estadístico "Statistical Analysis System (SAS) versión 9.4". También se realizó un análisis de correlación de Pearson con el software estadístico "Jeffreys's Amazing Statistics Program (JASP) versión 0.14.1.0" entre las variables espectrales y las variables de suelos.

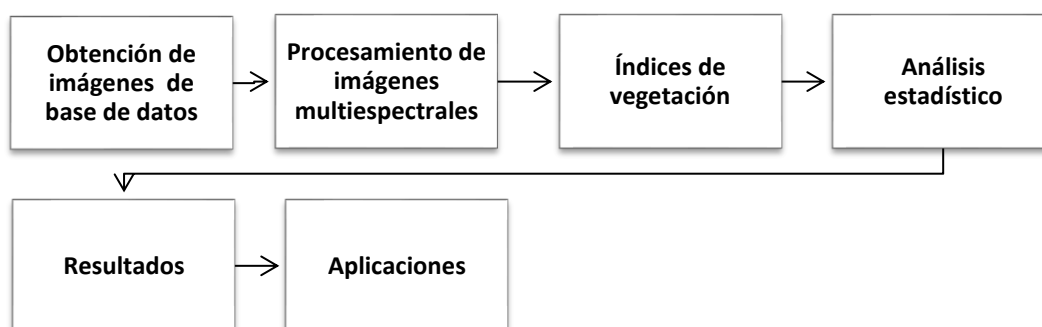
**Figura 5**

*Diagrama de flujo de las actividades desarrolladas para la determinación de la duración del efecto del subsoleo en la calidad del suelo y la producción de pasturas, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano.*



**Figura 6**

*Diagrama de flujo de las actividades desarrolladas para la determinación de la duración del efecto del subsoleo en la producción de pasturas mediante el uso de imágenes multiespectrales de satélites, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano.*



## Resultados y Discusión

### Análisis Físico y pH de los Suelos para el Lote de Vaquillas

Se encontró diferencia significativa ( $p < 0.009$ ) para las variables densidad aparente, porosidad ( $p < 0.04$ ), abundancia de raíces ( $p < 0.01$ ) y pH ( $p < 0.01$ ) para los tres horizontes en los suelos tres años después de realizado el subsoleo (Cuadro 5). Esto demuestra que el efecto de subsoleo superficial en las variables físicas del suelo aún están presentes tres años después de realizado el subsoleo. Cabe resaltar que en campo no se pudo determinar la resistencia a la penetración, en todos los casos, debido a que las descripciones de los suelos se realizaron en la época seca cuando se encuentran completamente endurecidos y este parámetro siempre es mayor de  $4.5 \text{ kg/cm}^2$ . No se observan diferencias en esta condición en todos los suelos y los horizontes descritos. Karlen et al. (1994), en su estudio sugiere que la mecanización del suelo por subsoleo puede realizarse en un intervalo de tiempo de dos o tres años, debido a que mantiene la estructura ocasionada por el rompimiento de la capa superficial lo que genera un suelo idóneo para el óptimo desarrollo de la vegetación.

#### Cuadro 5

*Efecto adecuación del suelo tres años posterior al subsoleo, en tres horizontes, Lote Vaquillas, Unidad de Ganado de Lechero, Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras.*

Horizonte	Tratamiento	Variable					
		DAP ( $\text{g/cm}^3$ )	Porosidad (%)	Abundancia de Raíces	Are (%)	Arc (%)	pH
1 ± (00-05cm)	Subsoleo	1.28	43.9	3.50	52.0	21.0	5.68 MA
	Sin Subsoleo	1.33b	40.2	2.12	54.0	18.0	5.23 FA
	CV (%)	13.5	11.7	0.27	9.24	20.9	4.04
	P	0.009**	0.04*	0.01*	0.60ns	0.34ns	0.03*
2 ± (05-20 cm)	Subsoleo	1.32	35.4	4.00	52.0	22.0	5.89 MA
	Sin Subsoleo	1.36	29.3	1.00	54.5	22.0	5.01 FA
	CV (%)	12.8	6.13	0.47	6.89	10.5	9.84
	P	0.003**	0.05*	0.002**	0.5ns	1.0ns	0.03*
3 ± (20-30 cm)	Subsolado	1.40	44.0	2.62	55.0	24.0	5.96 MA
	Sin Subsoleo	1.52	36.7	2.18	57.0	19.0	5.46 FA
	CV (%)	11.6	2.76	0.37	7.43	8.49	11.8
	P	0.02*	0.02*	0.45ns	0.54ns	0.008***	0.30ns

*Nota.* Variables: DAP: Densidad aparente ( $\text{g/cm}^3$ ), Abundancia de Raíces (escala de 1 a 4): 1= ausentes, 2= pocas, 3=frecuentes, 4=abundantes. CV (%) Coeficiente de variación. pH: MA = moderadamente ácido, FA= fuertemente ácido, LA= ligeramente ácido. \*\*\*Altamente significativo ( $p < 0.0001$ ), \*\* ( $p$  0.01 a 0.0001), \* ( $p$  0.05 a 0.01), ns no significativo.

La densidad aparente es menor en todos los horizontes en el lote con subsoleo al compararlo con el lote sin subsoleo, es importante mencionar que la densidad aparente para el segundo y tercer horizonte aumenta sin afectar el crecimiento de raíces. Estos resultados concuerdan con los encontrados por Sojka et al. (1997), ellos mencionan que al utilizar subsoleo superficial (30cm) la densidad aparente en el primer horizonte se reduce al compararlo con tratamientos sin subsoleo.

El porcentaje de porosidad se mantuvo alto en todos los horizontes de ambos tratamientos, lo que demuestra una relación con el desarrollo radicular. Drewry et al. (2000), trabajaron sobre el efecto del subsoleo y la producción de pastos, ellos mencionan que el suelo con subsoleo tuvo una mayor porosidad y reducción en la densidad aparente, aunque de (18-24cm) se produjo una recompactación, estos resultados fueron evidentes hasta 2.5 años después del subsolado.

Al comparar la abundancia de raíces para los tres horizontes en ambos tratamientos se presenta una mayor cantidad de raíces en el lote con subsoleo. Estos resultados no concuerdan con los encontrados por Vepraskas y Hoyt (1988), donde mencionan que el efecto residual del subsoleo en el crecimiento de raíces, se mantiene dos años posteriores a la labranza y desaparece al tercer año por efecto de re-compactación. Sin embargo, Harrison et al. (1994), al evaluar el efecto del subsoleo en las propiedades físicas del suelo, crecimiento de raíces y rendimientos de las pasturas, encontró diferencias significativas donde el subsoleo aumentó el porcentaje total de raíces presentes, incluso por debajo de los 30 cm, al compararlo con un área sin subsoleo.

La interpretación pH (Cuadro 2) muestra que los suelos no están dentro de los mismos rangos según la clasificación entre los dos tratamientos. Para el terreno subsolado se encuentra un pH moderadamente ácido para los tres horizontes (5.68- 5.96), mientras que para el sin subsoleo el pH es fuertemente ácido (5.01-5.46), presentando de esa manera mejores rangos en el terreno

subsulado. Cabe recalcar que el pH para ambos tratamientos está en el rango adecuado para el crecimiento de los pastos presentes, lo que puede tener un efecto en el desarrollo de las pasturas más evidente en el área sin subsoleo. Rodríguez López (2009), menciona que el pH adecuado para *Panicum máximum* debe estar en rangos de 6 a 8. Además, Guerra Acevedo y Lagos Lazo (2014) menciona que requiere suelos de media a alta fertilidad con un pH de 5 a 8.

### **Análisis Físico y pH de los Suelos para el Lote de La L**

Se encontró diferencia significativa en la variable densidad aparente ( $p < 0.04$ ) en el segundo horizonte, en el tercer horizonte hubo una diferencia significativa en las variables densidad aparente, porosidad ( $p < 0.02$ ) y pH ( $p < 0.05$ ) en los suelos seis años después de realizado el subsoleo. Se obtuvo diferencia significativa en el primer horizonte en el porcentaje de arena ( $p < 0.004$ ) y arcilla ( $p < 0.008$ ). El segundo horizonte presentó una diferencia significativa para el porcentaje de arena ( $p < 0.0003$ ) y arcilla ( $p < 0.0005$ ) (Cuadro 6). Esto puede ser resultado de la variabilidad de las propiedades del suelo que se pueden dar por condiciones ambientales, porcentaje de arena, limo y arcilla, tipo y manejo de suelo (Jaramillo 2012; Vásquez et al. 2010; Velázquez 2017; Jaramillo et al. 2008). A causa de la diferencia de clases texturales no se puede demostrar el efecto del subsoleo seis años después de realizado. McKyes (1985), sustenta que el efecto de subsoleo dependerá de varios factores como la densidad aparente, contenido de humedad, clase textural, tipo de subsolador y la potencia con la que trabaje.

La densidad aparente se encuentra más alta en el tratamiento con subsoleo, sin embargo, las densidades para ambos tratamientos están dentro del rango óptimo para el crecimiento de raíces. Estos resultados concuerdan con los encontrados por Schneider y Don (2019) donde menciona que la persistencia de los efectos del subsoleo en porosidad y densidad aparente son benéficos, pero disminuyen en el tiempo.

El porcentaje de porosidad entre tratamientos se mantiene similar, lo que indica que existió una leve compactación a largo plazo, lo que evidencia que el efecto del subsoleo 6 años después ya

no está presente. Estos resultados no concuerdan con los encontrados por Schneider y Don (2019) quien menciona que el efecto del subsoleo en la porosidad tiene resultados positivos debido a que rompe la capa compactada, teniendo como efecto una mayor cantidad de poros, los cuales serán ocupados por las raíces formando bioporos, lo que mantendrá una alta porosidad durante años después de realizado el tratamiento. Sin embargo, Carter (1988), menciona que la re-compactación del suelo puede ocurrir tres años posteriores a la labranza, desde el primer año, ocasionado por un periodo de humedecimiento y sequía.

### Cuadro 6

*Efecto adecuación del suelo seis años posteriores al subsoleo, en tres horizontes, Lote La "L", Unidad de Ganado de Carne, Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras.*

Horizonte	Tratamiento	Variable						
		DAP (t/m <sup>3</sup> )	Porosidad (%)	Abundancia de Raíces	Are (%)	Arc (%)	E. E	pH
1 ± (00-20cm)	Subsoleo	1.49	42.5	4.00	28.5	35.0	6.00	5.44 FA
	Sin Subsoleo	1.45	43.8	3.50	54.0	19.0	5.00	5.47 FA
	CV (%)	3.61	4.22	0.22	12.3	14.9	8.00	4.57
	P	0.41	0.48	0.13	0.004	0.006	0.34	0.88
		ns	ns	ns	**	**	Ns	ns
2 ± (20-32 cm)	Subsoleo	1.59	42.5	3.00	31.5	34.5	5.75	5.56 FA
	Sin Subsoleo	1.40	40.1	2.50	52.0	21.0	6.00	5.91 MA
	CV (%)	5.48	5.05	0.21	11.9	9.85	6.02	5.91
	P	0.04	0.36	0.13	0.0003	0.0005	0.39	0.32
		*	ns	ns	**	**	Ns	ns
3 ± (32-40 cm)	Subsolado	1.59	43.0	2.50	37.0	30.0	3.75	5.67 MA
	Sin Subsoleo	1.49	40.0	2.00	41.0	23.0	5.00	6.27 LA
	CV (%)	2.94	9.95	21.4	46.9	28.7	38.1	5.99
	P	0.02	0.02	0.18	0.76	0.28	0.33	0.05
		*	*	ns	ns	ns	Ns	*

*Nota.* Variables: DAP: Densidad aparente (g/cm<sup>3</sup>), Abundancia de Raíces (escala de 1 a 4): 1= ausentes, 2= pocas, 3=frecuentes, 4=abundantes. CV (%) Coeficiente de variación. pH: MA = moderadamente ácido, FA= fuertemente ácido, LA= ligeramente ácido.

\*\*\*Altamente significativo (p<0.0001), \*\* (p 0.01 a 0.0001), \*(p 0.05 a 0.01), ns no significativo.

En la variable abundancia de raíces, no se encuentran diferencias significativas para los lotes con y sin subsoleo en ningún horizonte, debido a que el crecimiento del sistema radicular de los pastos se comportó de manera similar, dichos resultados concuerdan con los encontrados por Taylor y Brar

(1991), quienes mencionan que, aunque las propiedades físicas como porosidad y densidad aparente alteran el desarrollo de las raíces, el crecimiento puede ser normal si la planta recibe agua y nutrientes.

En la variable estabilidad estructural de los agregados no se demostró diferencias significativas en ningún horizonte. Esto demuestra que ambos lotes están en un rango de estabilidad estructural adecuado con suelos bien estructurados. Esta variable afecta al suelo en la época de lluvia debido a que, si es más estable la conformación de estructura de los agregados, es menos suelo el que se pierde por erosión. Estos resultados concuerdan con los encontrados por Pinto et al. (2016), quienes encontraron óptima estabilidad estructural en suelos franco arcillosos mecanizados.

Al comparar el pH de todos los horizontes en ambos tratamientos se puede observar que se encuentra en un rango de mayor acidez el área subsolada estos resultados concuerdan con los encontrados por Pantoja Guamán (2005), donde en su estudio menciona que para los suelos subsolados el pH se encontró en niveles más bajos, esto se atribuye al resultado de lixiviación de nutrientes y cationes del suelo.

#### ***Análisis Físico y pH de los Suelos para el Lote de Zorrales 6 y Los Mingos***

En el primer horizonte se encontró diferencia significativa en la variable densidad aparente y abundancia de raíces ( $p < 0.04$ ). Se presentó diferencias significativas en el segundo horizonte para la variable densidad aparente ( $p < 0.008$ ). En el tercer horizonte se obtuvo una diferencia significativa en la variable abundancia de raíces ( $p < 0.05$ ) en los suelos doce años después de realizado el subsoleo (Cuadro 7).

Al comparar los resultados entre tratamientos se aprecia que la densidad aparente en el primer horizonte es mayor en el lote con subsoleo, de esta manera se observa un grado de compactación para el primer horizonte. Para el segundo y tercer horizonte es menor la densidad aparente para el tratamiento con subsoleo y se observa un porcentaje de porosidad alto respecto al primer horizonte. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Guerra Serrano y Mendieta

Servellón (2011), donde se mantuvo el efecto de subsoleo a través del tiempo en el segundo horizonte para la densidad aparente y el espacio poroso en el mismo lote de estudio (Zorrales 6).

### Cuadro 7

*Efecto adecuación del suelo doce años posterior al subsoleo, en tres horizontes, subsolado (Lote Zorrales 6) vs no subsolado (Lote Los Mingos), Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras.*

Horizonte	Tratamiento	Variable						
		DAP t/m <sup>3</sup>	Porosidad %	Abundancia de Raíces	Are (%)	Arc (%)	E. E	pH
1 (00-20cm)	Subsoleo	1.35	39.5	2.75	41.0	22.5	6.00	6.41LA
	Sin Subsoleo	1.26	42.8	4.00	44.0	24.0	5.00	6.35LA
	CV (%)	3.78	5.37	20.1	31.7	18.2	14.8	3.17
	P	0.04*	0.09ns	0.04*	0.76ns	0.63ns	0.13ns	0.70ns
2 (20-30cm)	Subsoleo	1.36	45.6	2.50	37.5	27.0	6.00	6.41LA
	Sin Subsoleo	1.49	43.6	3.00	45.0	23.0	5.00	6.36LA
	CV (%)	1.24	1.51	14.8	30.1	26.5	14.8	1.42
	P	0.008**	0.16ns	0.18ns	0.45ns	0.42ns	0.18ns	0.44ns
3 (30-50cm)	Subsolado	1.45	35.3	2.25	49.5	24.0	5.25	6.75N
	Sin Subsoleo	1.50	43.1	3.00	49.0	22.0	4.50	6.49LA
	CV (%)	6.66	21.0	18.1	30.5	49.9	11.0	1.56
	P	0.54ns	0.13ns	0.05*	0.96ns	0.81ns	0.09ns	0.96ns

*Nota.* Variables: DAP: Densidad aparente (g/cm<sup>3</sup>), Abundancia de Raíces (escala de 1 a 4): 1= ausentes, 2= pocas, 3=frecuentes, 4=abundantes. CV (%) Coeficiente de variación. pH: MA = moderadamente ácido, FA= fuertemente ácido, LA= ligeramente ácido.

\*\*\*Altamente significativo (p<0.0001), \*\* (p 0.01 a 0.0001), \*(p 0.05 a 0.01), ns no significativo.

Cabe recalcar que las características físicas del suelo del lote de Zorrales 6 antes llamado Zorrales 7, presenta diferentes clases texturales entre horizontes. En la mayoría de los horizontes para el lote de Zorrales 6 se presentan texturas francas y franco arcillosas, en el lote de Los Mingos se presentan texturas franco-arenosas y franco arcillosas. Farrakh Nawaz et al. (2012), mencionan que al someter presiones y humedad en suelos francos y franco arenosos se comportaron de manera diferente. Para el suelo franco demostró que en estado seco fue resistente a la compactación, mientras que en estado húmedo fue muy susceptible. En cambio, al evaluar los suelos franco-arenosos determinó pequeños aumentos con contenido de humedad. Smith et al. (1996), dicen que este comportamiento diferente se atribuye a que las densidades aparentes son diferentes, siendo mayor



para suelos franco-arenosos. En este sentido, se asocia que este comportamiento en el cambio de densidad aparente puede darse a su clase textural.

Para la abundancia de raíces se muestra que en lote sin subsoleo hay una elevada presencia de raíces para los tres horizontes con respecto al lote con subsoleo. Estos resultados no concuerdan con los encontrados por Barber y Díaz (1992), quienes encontraron que el número de raíces incrementó en las parcelas subsoladas a diferencias de las no subsoladas en un suelo franco arenoso.

La estabilidad estructural de los agregados en el primer y segundo horizonte se mantuvieron de manera similar entre tratamientos, siendo mayor para el lote subsolado. En el tercer horizonte se encuentra una menor estabilidad estructural en suelos con y sin subsoleo, manteniéndose mayor para el lote subsolado.

El pH muestra estar en el rango adecuado para el desarrollo del pasto en ambos lotes, por lo que, no debería influir en el desarrollo del cultivo, sin embargo, para el terreno no subsolado (lote Los Mingos), el pH tiende hacer ligeramente más ácido.

#### **Análisis de Índices Espectrales para el Lote de Vaquillas, Unidad Ganado Lechero, en los Años 2018-2021.**

Se encontró diferencia significativa ( $p < 0.0001$ ) para Índice de Humedad de Diferencia Normalizada (NDMI) en todos los años (Cuadro 8). El NDMI muestra que el lote con subsoleo presenta mayor porcentaje de humedad evidenciando que el efecto del subsoleo tres años después, para la retención de agua se mantiene.

**Cuadro 8**

*Índices espectrales para cada tratamiento con subsoleo y sin subsoleo, en los meses de junio a diciembre en los años 2018-2021. Lote Vaquillas, Unidad de Ganado Lechero, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano Honduras.*

Año	Tratamiento	Índices		
		NDVI	NDMI	SAVI
2019	Subsoleo	0.64	0.31	0.40
	Sin Subsoleo	0.62	0.18	0.39
	CV (%)	12.0	22.9	19.4
	P	0.51ns	<0.0001***	0.61ns
2020	Subsoleo	0.63	0.27	0.39
	Sin Subsoleo	0.62	0.16	0.39
	CV (%)	11.8	0.18	13.1
	P	0.71ns	<0.0001***	0.65ns
2021	Subsoleo	0.62	0.25	0.37
	Sin Subsoleo	0.59	0.18	0.37
	CV (%)	17.4	25.4	19.5
	P	0.47ns	<0.0001***	0.62ns

*Nota.* NDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, NDMI: Índice de Humedad de Diferencia Normalizada, SAVI: Índice de Vegetación Ajustado al Suelo. \*\*\*Altamente significativo ( $p < 0.0001$ ), \*\* ( $p 0.01$  a  $0.0001$ ), \* ( $p 0.05$  a  $0.01$ ), ns no significativo.

Los valores de NDVI encontrados oscilan entre 0.50 y 0.63, estos resultados concuerdan con los encontrados por Bastidas et al. (2016), ellos evaluaron la variabilidad temporal en fincas lecheras en Colombia, en el cual se mantuvo un índice de vegetación estable oscilando entre (0.40-0.80).

El Índice de Humedad de Diferencia Normalizada (NDMI) muestra mejores resultados del efecto del subsoleo para el contenido de humedad de los pastos entre tratamientos, donde se encuentra una diferencia significativa a favor del lote subsolado. Gao (1996), menciona que este índice es útil para estimar el contenido de humedad en la vegetación, debido a la correlación que existe entre el contenido de humedad de la vegetación y este índice. Holguín (2020), en su estudio "Diseño hidrológico en línea clave" en estos mismos lotes de la Unidad de Reemplazo de Ganado de Leche en Zamorano, menciona que los suelos que fueron subsolados tienden a retener mayor cantidad de agua a los 30 cm.

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y el índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI), presentan una tendencia con una vegetación moderada y alto estrés hídrico para todos los años. Esta diferencia entre estos dos índices se presenta por el factor de corrección de la reflectancia del suelo del índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) (Huete 1988). Malakhov y Tsyhuyeva (2020), mencionan que el índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) proporciona resultados más precisos en comparación con el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).

#### **Análisis de Índices Espectrales para el Lote La L, Unidad Ganado de Carne, 2018-2021**

En los índices de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), índice de humedad de diferencia normalizada (NDMI) y el índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) se encontró diferencia significativa ( $p < 0.001$ ), ( $p < 0.02$ ), ( $p < 0.008$ ) en el año 2018. Se obtuvo una diferencia significativa ( $p < 0.005$ ) para el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), y el índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) ( $p < 0.02$ ), en el año 2019. Los tres índices evaluados presentaron diferencias significativas para el año 2020, el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) indicó ( $p < 0.01$ ), el índice de humedad de diferencia normalizada (NDMI) y el índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) presentaron una diferencia significativa de ( $0.001$ ) (Cuadro 9).

**Cuadro 9**

*Índices espectrales para cada tratamiento para cada tratamiento con subsoleo y sin subsoleo, en los meses de junio a diciembre desde el año 2018-2021. Lote La L, Unidad de Ganado de Carne, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano Honduras.*

Año	Tratamiento	Índices		
		NDVI	NDMI	SAVI
2018	Subsoleo	0.62	0.25	0.35
	Sin Subsoleo	0.54	0.20	0.41
	CV (%)	7.05	25.7	19.2
	P	0.001 **	0.02 *	0.008 **
2019	Subsoleo	0.55	0.22	0.37
	Sin Subsoleo	0.60	0.23	0.41
	CV (%)	17.9	38.9	30.0
	P	0.05 *	0.39 ns	0.02 *
2020	Subsoleo	0.70	0.19	0.44
	Sin Subsoleo	0.65	0.26	0.51
	CV (%)	11.8	26.3	11.9
	P	0.005 *	0.001 **	0.001 **
2021	Subsoleo	0.61	0.22	0.42
	Sin Subsoleo	0.61	0.21	0.43
	CV (%)	23.4	42.0	25.1
	P	0.79 ns	0.84 ns	0.64 ns

*Nota.* <sup>abc</sup> Valores en las columnas con letras diferentes son estadísticamente diferentes ( $p < 0.05$ ). NDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, NDMI: Índice de Humedad de Diferencia Normalizada, SAVI: Índice de Vegetación Ajustado al Suelo. \*\*\*Altamente significativo ( $p < 0.0001$ ), \*\* ( $p < 0.01$  a  $0.0001$ ), \* ( $p < 0.05$  a  $0.01$ ), ns no significativo.

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) para el año 2018, 2019 y 2020 muestra una vegetación densa para el lote subsolado y moderada en el lote sin subsoleo. El índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) señala una vegetación densa lo que demuestra que ambos lotes mantuvieron coberturas similares, este índice presentó una diferencia significativa para los mismos años que NDVI siendo favorable para el lote sin subsoleo, esto se debe porque ambos indican la cantidad de vegetación.

Los valores para el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) para este estudio oscilan entre 0.54 a 0.72 dando como resultado una vegetación densa. Estos valores de NDVI obtenidos concuerdan con los obtenidos por Posada Asprilla et al. (2019), donde obtuvieron valores que oscilaban entre 0.66 y 0.89 donde estimó la calidad y cantidad de los pastos Kikuyo usando imágenes multiespectrales.

#### **Análisis de Índices Espectrales para los Lotes de Zorrales 6 y Los Mingos, EAP, Zamorano, 2018-2021**

En el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) se presentó una diferencia significativa ( $p < 0.03$ ) y ( $p < 0.006$ ) en los años 2020 y 2021. En el índice de humedad de diferencia normalizada (NDMI), se observó una diferencia significativa ( $p < 0.01$ ) en el año 2020. Para el índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI), se encontró una diferencia significativa ( $p < 0.001$ ) y ( $p < 0.001$ ) en los años 2018 y 2020 (Cuadro 10).

El NDVI demuestra que los pastos presentaron una vegetación moderada para el año 2018, el resto de los años se mantuvo con una cobertura densa para ambos tratamientos al igual que en el índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI). Estos resultados concuerdan con los encontrados por Cáceres (2013), quien obtuvo resultados con vegetación densa. Además, Edirisinghe et al. (2012), obtuvieron los mismos resultados encontrados donde el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) presentó vegetación densa en la producción de pastos.

Según los datos obtenidos y el uso de la tabla de interpretación (Cuadro 4) de valores de NDMI muestra que los pastos mantuvieron una cobertura media y presencia de estrés hídrico, estos resultados concuerdan con los encontrados por Mejía (2020), quien encontró que el NDMI demuestra la presencia de estrés hídrico que puede tener la cobertura.

**Cuadro 10**

*Evaluación de los tres diferentes índices espectrales para cada tratamiento con subsoleo (Zorrales 6) y sin subsoleo (Los Mingos), en los meses de junio a diciembre desde el año 2018-2021, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano Honduras.*

Año	Tratamiento	Índices		
		NDVI	NDMI	SAVI
2018	Subsoleo	0.53	0.25a	0.38a
	Sin Subsoleo	0.56	0.24a	0.32b
	CV (%)	20.6	13.7	17.6
	P	0.54	0.42	0.005
		ns	ns	**
2019	Subsoleo	0.63b	0.23a	0.41
	Sin Subsoleo	0.67a	0.24a	0.41
	CV (%)	14.1	19.1	16.5
	P	0.24	0.61	1.0
		ns	ns	ns
2020	Subsoleo	0.71a	0.29a	0.47a
	Sin Subsoleo	0.67b	0.25b	0.40b
	CV (%)	8.93	16.9	12.4
	P	0.03	0.01	0.001
		*	*	**
2021	Subsoleo	0.57b	0.22a	0.40b
	Sin Subsoleo	0.66a	0.22a	0.45a
	CV (%)	15.8	25.9	23.1
	P	0.006	1.0	0.15
		**	ns	ns

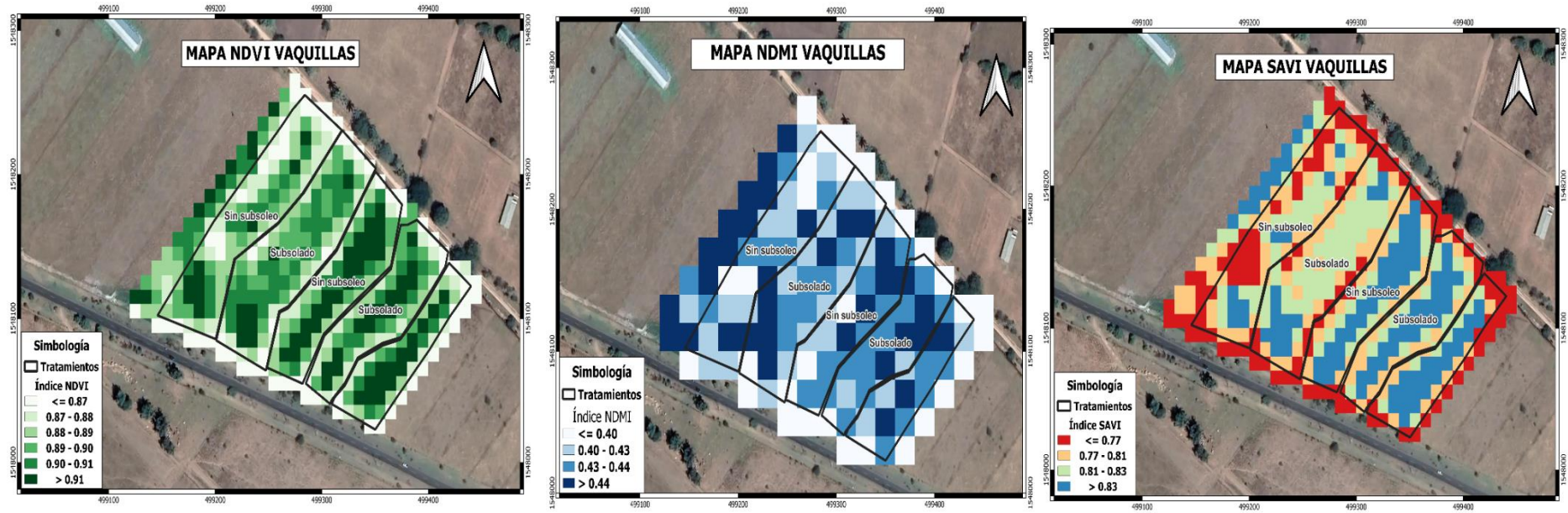
*Nota.* <sup>abc</sup> Valores en las columnas con letras diferentes son estadísticamente diferentes ( $p < 0.05$ ). NDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, NDMI: Índice de Humedad de Diferencia Normalizada, SAVI: Índice de Vegetación Ajustado al Suelo

**Mapas de Distribución Espacial de Índices de Vegetación**

Los mapas de índices espectrales muestran las zonas de mejor desarrollo y humedad que existe en los pastos de los lotes (Figura 7,8 y 9). Los colores más intensos demuestran una mayor calidad y contenido de humedad en las plantas.

Figura 7

Mapas para el lote de Vaquillas, Unidad de Ganado lechero, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Comportamiento de la vegetación para los lotes con subseleo y sin subseleo para el mes de septiembre de 2021.

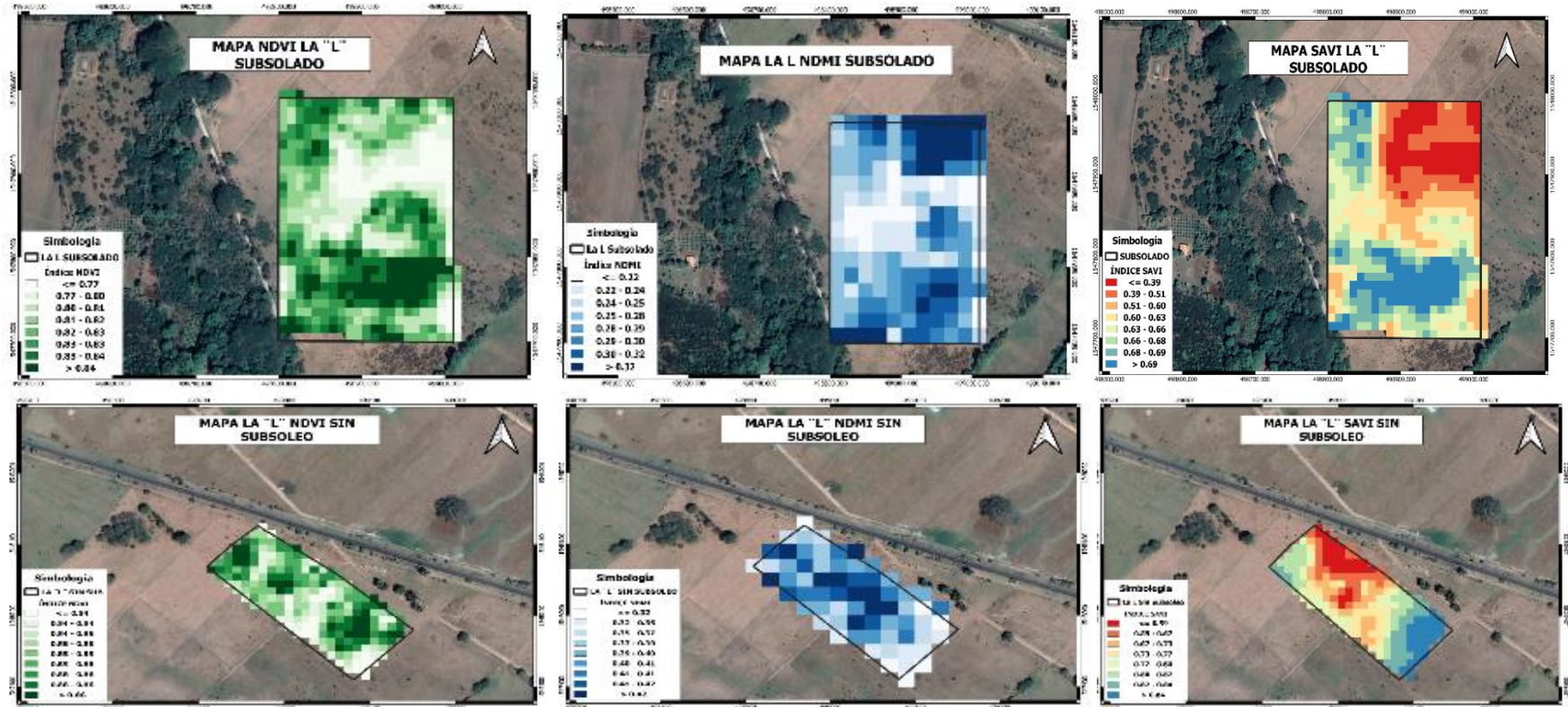


Nota. Se tomó este mes como referencia por obtener los picos más altos para los tres índices (ver anexo S). La banda verde fue tomada para representar los valores de NDVI, la banda azul para valores de NDMI y la banda espectral para el índice SAVI



Figura 8

Mapas para el Lote de La L, Unidad de Ganado de Carne, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Comportamiento de la vegetación para los lotes con subsoleo y sin subsoleo para el mes de septiembre de 2021.

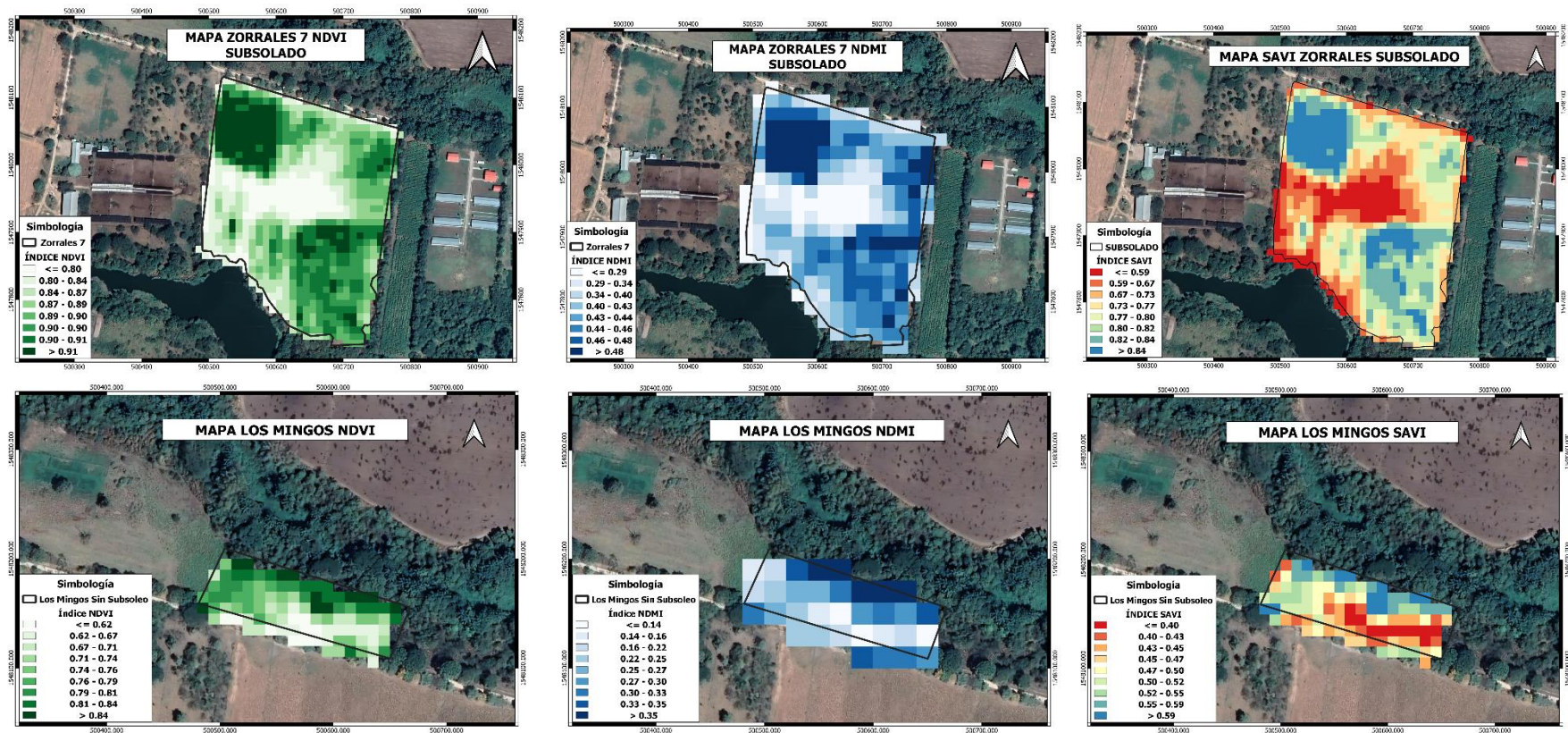


Nota. se tomó este mes como referencia por obtener los picos más altos para los tres índices (ver anexo T). La banda verde fue tomada para representar los valores de NDVI, la banda azul para valores de NDMI y la banda espectral para el índice SAVI.



Figura 9

Mapas para el Lote Zorrales 6 (subsulado) vs lote Los Mingos (no subsulado), Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras. Comportamiento de la vegetación para los lotes con subsolado y sin subsolado para el mes de septiembre de 2021.



Nota. se tomó este mes como referencia por obtener los picos más altos para los tres índices (ver anexo U). La banda verde fue tomada para representar los valores de NDVI, la banda azul para valores de NDMI y la banda espectral para el índice SAVI.

### Correlación entre las Variables Físicas y pH del Suelo y Variables Espectrales

Los índices de vegetación se correlacionaron de forma negativa y positiva con las variables físicas y pH. El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) señala una correlación positiva con la variable densidad aparente ( $p < 0.01$ ) y pH ( $p < 0.05$ ). El índice de humedad de diferencia normalizada (NDMI), mostró una correlación negativa con la variable pH ( $p < 0.05$ ), porcentaje de arena ( $p < 0.001$ ) y mantuvo una correlación positiva con el porcentaje de arcilla ( $p < 0.001$ ). El índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI), presentó una correlación positiva con la variable densidad aparente ( $p < 0.05$ ) y una correlación negativa en la variable pH ( $p < 0.05$ ) (Cuadro 11).

#### Cuadro 11

*Correlación de Pearson entre variables físicas y pH del suelo y variables espectrales determinadas en áreas de pastoreo en los terrenos de producción ganadera en Zamorano, Honduras.*

Variable	DAP	Porosidad	pH	Are (%)	Arc (%)	E. E
NDVI	0.382**	-0.124ns	0.335*	0.086ns	-0.134ns	0.015ns
NDMI	-0.251ns	0.105ns	-0.316*	-0.55***	0.588***	-0.259ns
SAVI	0.348*	-0.032ns	-0.032*	0.26ns	-0.274ns	0.030ns

*Nota.* Variables: DAP: Densidad Aparente, E.E: Estabilidad Estructural. \*, \*\*, \*\*\*, ns Significativo al  $p < 0.05$ ,  $p < 0.01$ ,  $p < 0.001$  y no significativo, respectivamente.

Para la correlación entre los índices de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y el índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) con la variable densidad aparente. Se debe a que estos dos índices se correlacionan directamente con la cobertura del suelo, el NDVI tiene una mayor sensibilidad al suelo de fondo y SAVI tiene un factor de corrección para poder rectificar la variabilidad de la reflectancia del suelo que tenga NDVI (Huete 1988).

La correlación para la variable pH y los tres índices espectrales de vegetación. Zhang et al. (2018), en su estudio de predicción de pH del suelo a través de teledetección donde utilizó variables de reflectancia como los índices de vegetación NDVI y NDMI son fuertemente predictores de la distribución del pH en el suelo. Los resultados encontrados por Zhang et al. (2018), donde trabajaron

una correlación de Pearson entre el pH del suelo y los índices espectrales con imágenes Landsat no concuerdan con este estudio debido a que para el índice de NDMI tuvo una fuerte correlación positiva y el NDMI una correlación negativa. Es claro que estos índices de reflectancia nos pueden dar una predicción de pH del suelo que irán en dependencia del tipo de cultivo, clase textural, etc.

Para el índice de humedad de diferencia normalizada (NDMI) y la correlación entre el porcentaje de arena y arcilla. Fadhil y Budhi (2022), menciona que se ha utilizado NDMI para identificar la humedad de la superficie del suelo e interpretar la textura del suelo, debido a la correlación que existe entre la humedad del suelo y la textura. (Yang et. al, 2015 como lo citó este mismo autor Fadhil y Budhi (2022), dice que hay una correlación directamente proporcional con la humedad del suelo y contenido de arcilla, debido a que, si hay un alto contenido de arcilla, la humedad del suelo es alta, comportándose de manera contraria para un alto contenido de arena. Las partículas de arena son las que menos humedad retienen ya que los suelos con alto contenido de arena son bien drenados y facilitan la aireación por el tamaño grande de sus partículas y espacio poroso. Las arcillas tienen un drenaje y aireación más bajo, esto se debe al pequeño tamaño de sus partículas, las moléculas de agua se adhieren fuertemente haciendo que estas tengan mayor capacidad de retener agua y nutrientes.

### **Conclusiones**

Subsolar el suelo mejora su condición física a la profundidad que alcanza el subsolador y se mantiene hasta por lo menos tres años posterior a la ejecución del subsoleo. Transcurrido más tiempo (6 y 12 años) se mantiene efecto de subsolar en algunas propiedades como la densidad aparente y porosidad en el segundo horizonte entre 20 y 30 cm de profundidad.

En la producción de pasturas, las imágenes multiespectrales tomadas por satélite Copernicus son una herramienta que permite evaluar el estado de la vegetación y su calidad (SAVI y NDVI) y el estrés hídrico y contenido de humedad (NDMI) que muestran diferencia por efecto de subsolar. El NDMI fue el mejor índice para evaluar este efecto hasta los cuatro años posteriores a subsolar. Después de ocho años, aunque se puede mostrar un efecto diferencial, no es claro atribuirlo al subsoleo.

### **Recomendaciones**

Al realizar prácticas de subsoleo en los terrenos pecuarios de Zamorano hacer un seguimiento y mantenimiento del lote para que su efecto se mantenga por varios años.

Antes de llevar a cabo el subsoleo se deben realizar calicatas y análisis del suelo para determinar la condición de los parámetros físicos y el grado de compactación para determinar el tipo de subsoleo, profundidad y dirección de los pases.

Dar seguimiento de la evaluación del subsoleo en época de lluvia y así obtener una mejor visión del efecto del subsoleo y de los factores evaluados.

Implementar el uso de drones y sensores remotos para mejorar la precisión del monitoreo de las pasturas.

## Referencias

- Alonso D. 2015. NDVI: Qué es y cómo calcularlo con SAGA desde QGIS. MappingGIS; [consultado el 11 de nov. de 2021]. <https://mappinggis.com/2015/06/ndvi-que-es-y-como-calcularlo-con-saga-desde-qgis/>.
- Arévalo G, Gauggel C. 2020. Manual de laboratorio manejo de suelos. 5ª ed. Tegucigalpa, Honduras.: LITOCOM.
- Aristizábal E, Valencia Y, Guerra A, Vélez M. 2011. Caracterización geotécnica de perfiles de meteorización desarrollados sobre rocas ígneas en ambientes tropicales. Boletín de Ciencias de la Tierra; [consultado el 4 de oct. de 2021]. (30):47–60. <http://www.scielo.org.co/pdf/bcdt/n30/n30a09.pdf>.
- Barber RG, Díaz O. 1992. Effects of deep tillage and fertilization on soya yields in a compacted Ustochrept during seven cropping seasons, Santa Cruz, Bolivia. Soil & Tillage Research. 22:371–381. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(92\)90050-L](https://doi.org/10.1016/0167-1987(92)90050-L).
- Bastidas A, Barahona R, Cerón M. 2016. Variation in the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in dairy farms in northern Antioquia. Livestock Research for Rural Developmen; [consultado el 21 de jun. de 2022]. 24(4):59. [https://www.researchgate.net/publication/296641914\\_Variation\\_in\\_the\\_Normalized\\_Difference\\_Vegetation\\_Index\\_NDVI\\_in\\_dairy\\_farms\\_in\\_northern\\_Antioquia/citations](https://www.researchgate.net/publication/296641914_Variation_in_the_Normalized_Difference_Vegetation_Index_NDVI_in_dairy_farms_in_northern_Antioquia/citations).
- Bouyoucos GJ. 1927. The hydrometer as a new method for the mechanical analysis of soils. Soil Science. 23(5):319–335. doi:10.1097/00010694-192705000-00002.
- Cáceres J, Pilar MI, Salas J. 2012. Vista de Análisis temporal del contenido de humedad en pasto en un ecosistema de DEHESA mediante imágenes Landsat, y su relación con factores climáticos. Revista Ciencias Espaciales; [consultado el 2 de nov. de 2021]. 5(1):66–84. <https://www.camjol.info/index.php/CE/article/view/2539/2293>.
- Cáceres JD. 2013. Análisis del comportamiento temporal de la biomasa en Pastos del Departamento de Olancho en el contexto del cambio global – Fase I. Ciencias Espaciales. 6(2):48–60. doi:10.5377/ce.v6i2.2467.
- Carter MR. 1988. -Penetration resistance to characterize the depth and persistence of soil loosening in tillage studies. Canadian Journal of Soil Science; [consultado el 17 de jun. de 2022]. 68(4):657–688. <https://cdnsiencepub.com/doi/pdf/10.4141/cjss88-063>.
- Castellanos G, Moreno M, Maldonado F. 2016. Obtención De Imágenes Índice De Vegetación Savi A Partir De Imágenes Milirreflectancia Toa. Argentina: Universidad Autónoma de Entre Ríos. <https://www.researchgate.net/publication/311442359>.
- CONAE. 2016. Índices Espectrales derivados de imágenes satelitales Landsat 8 Sensor OLI. [sin lugar]: [sin editorial]; [consultado el 10 de nov. de 2021]. 15 p. <https://catalogos.conae.gov.ar/landsat8/Docs/IndicesEspectralesDerivadosDeLandsat8.pdf>.
- Drewry JJ, Lowe AH, Paton RJ. 2000. Effect of subsoiling on soil physical properties and pasture production on a Pallic Soil in Southland, New Zealand. New Zealand Journal of Agricultural Research. 43(2):269–277. doi:10.1080/00288233.2000.9513427.

- Edirisinghe A, Clark D, Waugh D. 2012. Spatio-temporal modelling of biomass of intensively grazed perennial dairy pastures using multispectral remote sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 16:5–16. doi:10.1016/j.jag.2011.11.006.
- Elvir Coello JA. 2016. Diagnóstico de la compactación de los suelos para determinar subsoleo y registro de su adecuación en lotes agropecuarios, Zamorano, Honduras [Tesis]. Tegucigalpa, Honduras.: Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. 50 p; [consultado el 14 de nov. de 2021]. <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/5913/1/CPA-2016-T037.pdf>.
- Escalante Nahui N. 2016. Eficiencia del subsoleo con aditamento de aletas en los cinceles [Tesis]. Tegucigalpa, Honduras.: Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. 31 p; [consultado el 15 de nov. de 2021]. <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/5915/1/CPA-2016-T039.pdf>.
- Fadhil S, Budhi S. 2022. Utilization of NDMI Method in Landsat 8 Satellite Imagery for Analysis of Multi-Hazard Susceptibility. *Gemilang Maju Publikasi Ilmiah (GMPi)*. 1:63–70. <https://journal.gmpionline.com/index.php/gmpics/article/view/86/76>. doi:10.53889/gmpics.v1.86.
- [FAO] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 2009. Guía para la descripción de suelos. 4ª ed. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura; [consultado el 29 de jun. de 2022]. <https://www.fao.org/3/a0541s/a0541s.pdf>.
- [FAO] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 2015. Tierra y Suelos: Objetivos de Desarrollo Sostenible. [sin lugar]: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura; [consultado el 5 de nov. de 2021]. <https://www.fao.org/sustainable-development-goals/overview/fao-and-post-2015/land-and-soils/es/>.
- [FAO] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 2018. Transformar la alimentación y la agricultura para alcanzar los ODS. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura; [consultado el 3 de nov. de 2021]. 76 p. <https://www.fao.org/3/I9900es/i9900es.pdf>.
- Farrakh Nawaz M, Bourrié G, Trolard F. 2012. Soil compaction impact and modelling. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 33:291–309. doi:10.1007/s13593-011-0071-8.
- Gao B. 1996. NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*. 58(3):257–266. doi:10.1016/S0034-4257(96)00067-3.
- Gauggel CA, Arevalo G, Barahona R. 2009. Índices de calidad de suelos para las propiedades morfológicas, físicas y químicas. *Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo*. <https://cutt.ly/DTcr55t>.
- Guerra Acevedo N, Lagos Lazo J. 2014. Análisis de la composición bromatológica de pastos y formulación de dietas para la producción de leche en el trópico [Tesis]. Tegucigalpa, Honduras.: Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano; [consultado el 2 de jul. de 2022]. <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/1268298e-ceb7-4cd3-ae1d-95ac51a166cc/content>.
- Guerra Serrano AJ, Mendieta Servellón JA. 2011. Subsoleo en suelos arcillosos masivos y fertilización con magnesio en el cultivo de pasto Tobiatá (*Panicum maximum*) [Tesis]. Tegucigalpa, Honduras.: Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. 34 p; [consultado el 15 de nov. de 2021]. <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/734/1/Copia%20de%20T3188.pdf>.

- Harrison DF, Cameron KC, McLaren RG. 1994. Effects of subsoil loosening on soil physical properties, plant root growth, and pasture yield. *New Zealand Journal of Agricultural Research*. 37(178):559–567. doi:10.1080/00288233.1994.9513095.
- Hernández CG, Escribano JA, Tarquis AM. 2014. Comparación del índice de vegetación de diferencia normalizada obtenido a diferentes escalas en pastos de dehesa. Madrid, España: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos, Universidad Politécnica; [consultado el 26 de may. de 2022]. [https://oa.upm.es/37488/1/INVE\\_MEM\\_2014\\_198432.pdf](https://oa.upm.es/37488/1/INVE_MEM_2014_198432.pdf).
- Herrick J, Whitford W, Soyza A, Van Zee J, Havstad K, Seybold C, Walton M. 2001. Field soil aggregate stability kit for soil quality and rangeland health evaluations. *Catena*. 44(1):27–35. doi:10.1016/S0341-8162(00)00173-9.
- Hilario EP. 2014. Pastos y forrajes tropicales introducidos y experimentados en el alto de mayo. Engormix; [consultado el 3 de nov. de 2021]. <https://www.engormix.com/ganaderia-carne/articulos/pastos-forrajes-tropicales-introducidos-t30925.htm>.
- Holguín JM. 2020. Evaluación del efecto de un diseño hidrológico en Línea Clave en pasturas de la Unidad de Reemplazos de Ganado de Leche en Zamorano, Honduras [Tesis]. Tegucigalpa, Honduras.: Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. ES;EN;FR;español;Spanish;French;spa; [consultado el 14 de nov. de 2021]. <https://bdigital.zamorano.edu/handle/11036/6722>.
- Huete AR. 1988. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*. 25(3):295–309. doi:10.1016/0034-4257(88)90106-X.
- Jackson TJ, Chen D, Cosh M, Li F, Anderson M, Walthall C, Doriaswamy P, Hunt ER. 2004. Vegetation water content mapping using Landsat data derived normalized difference water index for corn and soybeans. *Remote Sensing of Environment*. 92(4):475–482. doi:10.1016/j.rse.2003.10.021.
- Jaramillo D. 2012. Variabilidad espacial del suelo: bases para su estudio. *Revista de la Facultad de Ciencias Universidad Nacional de Colombia*; [consultado el 6 de jul. de 2022]. 1(1):73–87. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rfc/article/download/49004/50077>.
- Jaramillo D, González H, Álvarez F. 2008. Variabilidad espacial de algunas propiedades físico - mecánicas de suelos de textura pesada. *CES Medicina Veterinaria y Zootecnia*; [consultado el 6 de jul. de 2022]. 3(2):10–19. <https://www.redalyc.org/pdf/3214/321428100001.pdf>.
- Karlen DL, Wollenhaupt NC, Erbach DC, Berry EC, Swan JB, Eash NS, Jordahl JL. 1994. Long-term tillage effects on soil quality. *Soil & Tillage Research*. 32:313–327. doi:10.1016/0167-1987(94)00427-G.
- Labrador M, Évora J, Arbelo M. 2012. Satélites de teledetección para la gestión del territorio. España: Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Aguas del Gobierno de Canarias. ISBN: 978-84-695-3276-8; [consultado el 23 de jun. de 2022]. [https://www.researchgate.net/publication/259230060\\_Satelites\\_de\\_teledeteccion\\_para\\_la\\_gestion\\_del\\_territorio](https://www.researchgate.net/publication/259230060_Satelites_de_teledeteccion_para_la_gestion_del_territorio).
- Lastovicka J, Svec P, Paluba D, Kobliuk N, Svoboda J, Hladky R, Stych P. 2020. Sentinel-2 Data in an Evaluation of the Impact of the Disturbances on Forest Vegetation. *Remote Sens*. 12(12). doi:10.3390/rs12121914.
- León R, Bonifaz N, Gutiérrez F. 2018. Pastos y forrajes del Ecuador (Siembra y producción de pasturas). 1ª ed. Ecuador: Editorial Universitaria Abya-Yala. ISBN: 978-9978-10-318-0; [consultado el 3 de nov. de 2021]. <https://cutt.ly/tTcr9CL>.



- Malakhov D, Tsyhuyeva NY. 2020. Calculation of the biophysical parameters of vegetation in an arid area of south-eastern Kazakhstan using the normalized difference moisture index (NDMI). *Central Asian Journal of Environmental Science and Technology Innovation*. 4:289-198. doi:10.22034/CAJESTI.2020.04.01.
- Martínez S. 2019. Humedad en los cultivos mediante teledetección: MOISTURE (NDMI). [sin lugar]: [sin editorial]; [actualizado 2019; consultado el 10 de nov. de 2021]. <https://www.cursosteledeteccion.com/humedad-en-los-cultivos-mediante-teledeteccion-moisture-ndmi/>.
- McKyes E, editor. 1985. *Soil Cutting and Tillage*. [sin lugar]: Elsevier Science Publishing Company Inc. ISBN: 9780444601049.
- Medina C. 2016. Efectos de la compactación de suelos por el pisoteo de animales, en la productividad de los suelos. *remediaciones. Revista colombiana de ciencia animal*; [consultado el 9 de nov. de 2021]. 8(1):88–93. <https://revistas.unisucre.edu.co/index.php/recia/article/download/229/270>.
- Mejía J. 2020. Análisis de la susceptibilidad de la cobertura vegetal a incendios mediante Índice de Diferencia Normalizada de Humedad (NDMI) y clasificación del IDEAM: caso de estudio subregión Bajo Sinú – Córdoba. Argentina: [sin editorial]; [consultado el 2 de jul. de 2022]. <https://repositorio.unicordoba.edu.co/bitstream/handle/ucordoba/3452/Mej%C3%ADaCogolloJuanDavid.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Muñoz Aguayo P. 2013. Tema Indices de vegetación, Pedro Muñoz A. Chile: Centro de Información de Recursos Naturales; [consultado el 9 de nov. de 2021]. 15 p. <https://cutt.ly/rTilH3z>.
- Osorio N. 2012. pH del suelo y disponibilidad de nutrientes. *Manejo Integral del Suelo y Nutrición Vegetal*; [consultado el 6 de jul. de 2022]. 1(4). <https://www.bioedafologia.com/sites/default/files/documentos/pdf/pH-del-suelo-y-nutrientes.pdf>.
- Pantoja Guamán JL. 2005. Efecto del subsoleo en la propiedades físicas y químicas del suelo y en el rendimiento de cuatro cultivos en Zamorano, Honduras [Tesis]. Tegucigalpa, Honduras.: Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano; [consultado el 17 de jun. de 2022]. <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/314373ba-4ffe-496e-8a7d-50ab16c63199/content>.
- Pinto Y, Álvarez J, Forero F. 2016. Efecto de la labranza en la estabilidad estructural y resistencia a la penetración en un Inceptisol sembrado con arracacha (*Arracacia xanthorrhiza* Bancroft) en Boyacá. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*. 10(1):99–112. doi:10.17584/rcch.2016v10i1.5049.
- Posada Asprilla W, Medina Sierra M, Cerón Muñoz M. 2019. Estimación de la calidad y cantidad de pasto kikuyo [*Cenchrus clandestinum* (Hochst. ex Chiov.) Morrone] usando imágenes multiespectrales. *U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. 22(1):1–195. doi:10.31910/rudca.v22.n1.2019.1195.
- Rodríguez López M. 2009. Rendimiento y Valor Nutricional del Pasto *Panicum Maximun* Cv. Mombaza a Diferentes Edades y Alturas de Corte. [Tesis]. Costa Rica: Instituto Tecnológico de Costa Rica; [consultado el 17 de jun. de 2022]. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/3946/Rendimiento%20y%20valor%20nutricional%20del%20pasto%20Panicum%20maximun%20CV%20mombaza%20a%20diferentes%20edades%20y%20alturas%20de%20corte.pdf?sequence=1>.

- Sánchez J. 2007. Utilización eficiente de las pasturas tropicales en la alimentación del ganado lechero. Universidad de Costa Rica, San José: Centro de Investigaciones en Nutrición Animal; [consultado el 5 de oct. de 2021]. <https://xdoc.mx/preview/utilizacion-eficiente-de-las-pasturas-tropicales-en-la-5dcd5e2e8938>.
- Schneider F, Don A. 2019. Root-restricting layers in German agricultural soils. Part II: Adaptation and melioration strategies. *Plant Soil*. 442(1-2):419–432. doi:10.1007/s11104-019-04186-8.
- Smith CW, Johnston MA, Lorentz S. 1996. Assessing the compaction susceptibility of South African forestry soils. I. The effect of soil type, water content and applied pressure on uni-axial compaction. *Soil & Tillage Research*. 41:53–73. doi:10.1016/S0167-1987(96)01084-7.
- Soil and Plant Analysis Council, Inc. 1999. *Soil Analysis Handbook of Reference Methods*. [sin lugar]: [sin editorial]. ISBN: 0-8493-0205-6.
- Sojka RE, Horne DJ, Ross CW, Baker CJ. 1997. Subsoiling and surface tillage effects on soil physical properties and forage oat stand and yield. *Soil & Tillage Research*. 40(3-4):125–144. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198796010756>. doi:10.1016/S0167-1987(96)01075-6.
- Taboada MA. 2007. Efectos del pisoteo y pastoreo animal sobre suelos en siembra directa. Sitio Argentino de Producción Animal; [consultado el 15 de jun. de 2022]. 71–83. [https://www.produccion-animal.com.ar/suelos\\_ganaderos/49-efectos\\_pisoteo.pdf](https://www.produccion-animal.com.ar/suelos_ganaderos/49-efectos_pisoteo.pdf).
- Taylor HM, Brar GS. 1991. Effect of soil compaction on root development. *Soil and Tillage Research*. 19(2-3):111–119. doi:10.1016/0167-1987(91)90080-H.
- Toribio G. 2019. NDVI, ¿qué es y para qué sirve? Cursos de Teledetección, Drones y LIDAR; [consultado el 2 de nov. de 2021]. <http://www.cursosteledeteccion.com/ndvi-que-es-y-para-que-sirve/>.
- Unión Europea. 2015. Copernicus: La mirada de Europa sobre la tierra. [sin lugar]: Comisión Europea; [consultado el 15 de jun. de 2022]. [https://www.copernicus.eu/sites/default/files/documents/Brochure/Copernicus\\_Brochure\\_ES\\_WEB.pdf](https://www.copernicus.eu/sites/default/files/documents/Brochure/Copernicus_Brochure_ES_WEB.pdf).
- Vásquez J, Baena D, Menjivar J. 2010. Variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas en suelos de la granja experimental de la Universidad del Magdalena (Santa Marta, Colombia). *Acta Agronómica*; [consultado el 6 de jul. de 2022]. 59(4):449–456. <http://www.scielo.org.co/pdf/acag/v59n4/v59n4a09.pdf>.
- Velázquez S. 2017. Variabilidad espacial de las propiedades físicas y químicas de un suelo acrisol cultivado con caña de azúcar [Tesis]. México: Universidad Popular de la Chontalpa; [consultado el 6 de jul. de 2022]. <https://www.atamexico.com.mx/wp-content/uploads/2017/11/1-Suelos-1.pdf>.
- Vepraskas MJ, Hoyt GD. 1988. Comparison of the Trench-Profile and Core Methods for Evaluating Root Distributions in Tillage Studies. *Agronomy Journal*. (80):166–172. doi:10.2134/agronj1988.00021962008000020006x.
- Vistoso E, Martínez J. 2020. Importancia del subsolado como práctica de manejo de praderas. Chile: Instituto de Investigación Agropecuarias. 4 p. Informativo Informe no. 260; [consultado el 9 de nov. de 2021]. <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/123456789/67253/NR42459.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Zhang Y, Sui B, Shen H, Wang Z. 2018. Estimating temporal changes in soil pH in the black soil region of Northeast China using remote sensing. *Computers and Electronics in Agriculture*. 154:204–212. doi:10.1016/j.compag.2018.09.005.

## Anexos

### Anexo A

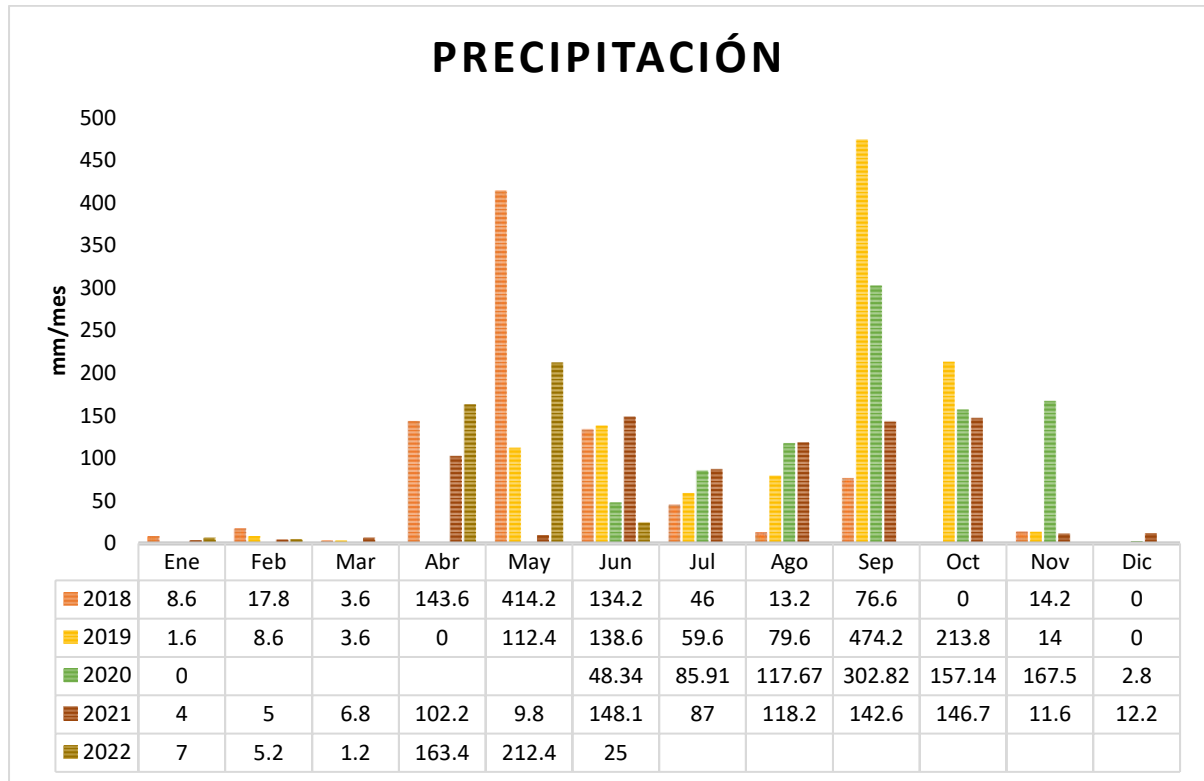
#### *Coordenadas de calicatas para cada lote evaluado*

Lote	Número de calicata	Coordenada de calicatas	
		Latitud	Longitud
La "L"	1	14°00'03"N	87°00'34"O
La "L"	2	14°00'01"N	87°00'38"O
La "L"	3	14°00'05"N	87°00'34"O
La "L"	4	14°00'08"N	87°00'36"O
La "L"	Control 1	14°00'09"N	87°00'30"O
La "L"	Control 2	14°00'10"N	87°00'34"O
Zorrales 6	1	14°00'11"N	86°59'42"O
Zorrales 6	2	14°00'08"N	86°59'38"O
Zorrales 6	3	14°00'03"N	86°59'36"O
Los Mingos	Control 1	14°00'13"N	86°59'39"O
Los Mingos	control 2	14°00'13"N	86°59'41"O
Vaquillas	1	14°00'12"N	87°00'25"O
Vaquillas	2	14°00'13"N	87°00'25"O
Vaquillas	Control 1	14°00'14"N	87°00'21"O
Vaquillas	Control 2	14°00'12"N	87°00'26"O

## Anexo B

Datos de precipitación de los años 2018 a 2022 (junio), estación meteorológica Zorrales 6, Escuela

Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras



## Anexo C

*Calicata lote de Vaquillas, Unidad de Ganado de Leche, área El Salvador (subsolado)*

Perfil No:	1
Fecha de descripción:	06/02/22
Ubicación:	Lote de Vaquillas (El salvador, subsolado)
Descrita por:	Dr. Gloria de Gauggel, Balcárcel y Moreno
Posición Geomorfológica:	Terraza media
Pendiente:	0 – 4 %, plano
Precipitación anual:	1100 mm
Temperatura media anual:	24 °C
Uso de tierra:	Ganadería pastoreo
Cultivo:	Pastura Tobiata, seca.
Drenaje natural:	Moderado
Erosión:	No
Humedad del suelo:	Punto de marchitez
Régimen de humedad:	Ústico
Régimen de temperatura:	Isohipertérmico



Horizonte	Profundidad (cm)	Caracterización
Ap	0 – 5	<b>Textura:</b> franco arenoso, estructura en bloques subangulares finos, muy finos y medios. <b>Agregados:</b> finos, muy finos y medios <b>Raíces:</b> abundantes, todos los tamaños <b>Poros:</b> todos los tamaños, vesiculares y tubulares. <b>Tamaño:</b> todos los tamaños <b>Frecuencia:</b> abundante <b>Continuidad:</b> conectados y no conectados <b>Forma:</b> vesiculares
Ad	5-12	<b>Textura:</b> franco arenoso <b>Agregados:</b> bloques angulares medios, bloques y finos <b>Raíces:</b> abundantes, todos los tamaños <b>Poros:</b> vesiculares y tubulares. <b>Tamaño:</b> todos los tamaños <b>Frecuencia:</b> abundante <b>Continuidad:</b> conectados y no conectados
C	12-30	<b>Textura:</b> franco arcillo arenoso <b>Agregados:</b> boques angulares medios <b>Raíces:</b> frecuentes <b>Poros:</b> vesiculares y tubulares. <b>Tamaño:</b> todos los tamaños <b>Frecuencia:</b> abundantes <b>Continuidad:</b> conectados y no conectados
C2	30 – 58	<b>Textura:</b> franco arenoso <b>Agregados:</b> bloques subangulares medios <b>Raíces:</b> frecuentes <b>Poros:</b> vesiculares y tubulares. <b>Tamaño:</b> todos los tamaños <b>Frecuencia:</b> abundante <b>Continuidad:</b> conectados y no conectados
C3	58 – 70x	<b>Textura:</b> franco arenoso <b>Agregados:</b> bloques subangulares medios <b>Poros:</b> vesiculares y tubulares. <b>Tamaño:</b> todos los tamaños <b>Frecuencia:</b> abundante <b>Continuidad:</b> conectados y no conectados

## Anexo D

*Calicata lote de Vaquillas, Unidad de Ganado de Leche, área Honduras (sin subsoleo)*

Perfil No: 2  
 Fecha de descripción: 12/02/22  
 Ubicación: Lote de Vaquillas  
 Descrita por: Balcárcel y Moreno  
  
 Posición Geomorfológica: Terraza media  
 Pendiente: 0 – 4 %, plano  
 Precipitación anual: 1100 mm  
 Temperatura media anual: 24 °C  
 Uso de tierra: Ganadería pastoreo  
 Cultivo: Pastura Tobiatá, seco  
 Drenaje natural: Moderado  
 Erosión: No  
 Humedad del suelo: punto de marchitez  
 Régimen de humedad: Ústico  
 Régimen de temperatura: Isohipertérmico



Horizonte	Profundidad (cm)	Caracterización
Ap	0 – 4	<b>Textura:</b> franco arenoso <b>Agregados:</b> bloques subangulares finos, muy finos y medios <b>Poros:</b> todos los tamaños, vesiculares y tubulares. <b>Tamaño:</b> todos los tamaños <b>Frecuencia:</b> abundante <b>Con:</b> conectados y no conectados <b>Forma:</b> vesiculares <b>Raíces:</b> abundantes, todos los tamaños
Ad	4-20	<b>Textura:</b> franco arenoso <b>Agregados:</b> bloques angulares medios y finos <b>Poros:</b> todos los tamaños, vesiculares y tubulares. <b>Raíces:</b> pocas <b>Tamaño:</b> todos los tamaños <b>Frecuencia:</b> conectados y no conectados
C	20-25	<b>Textura:</b> franco arenoso <b>Agregados:</b> bloques angulares medios, finos y muy finos. <b>Poros:</b> finos <b>Raíces:</b> frecuentes <b>Tamaño:</b> todos los tamaños <b>Frecuencia:</b> abundante, conectados y no conectados
C2	25 – 40	<b>Textura:</b> franco arenoso <b>Agregados:</b> bloques angulares, grandes, medios, finos y muy finos <b>Poros:</b> muy finos <b>Raíces:</b> pocas <b>Tamaño:</b> todos los tamaños <b>Frecuencia:</b> abundante <b>Continuidad:</b> conectados y no conectados

## Anexo E

## Calicatas lote La "L", Unidad de Ganado de Carne, área subsolada

Perfil No: 1  
 Fecha de descripción: 11/03/22  
 Ubicación: La "L"  
 Descrita por: Balcárcel y Moreno  
 Posición Geomorfológica: Terraza media  
 Pendiente: 0 – 2%, plano  
 Precipitación anual: 1100 mm  
 Temperatura media anual: 24°C  
 Uso de tierra: Ganadería pastoreo  
 Cultivo: Pastura Mombaza, seco.  
 Drenaje natural: Pobre a moderado  
 Erosión: No  
 Humedad del suelo: Punto de marchitez



Horizonte	Profundidad (cm)	Caracterización
Ap	0-23	<b>Textura:</b> franco arcilloso <b>Agregados:</b> bloques angulares, muy finos y subangulares, finos, medio, grueso y muy grueso <b>Poros:</b> vesiculares y tubulares <b>Raíces:</b> abundantes, de todos los tamaños <b>Tamaño:</b> todos los tamaños <b>Frecuencia:</b> abundantes <b>Continuidad:</b> no conectados y conectados Primer horizonte compactado
E	23-34	<b>Textura:</b> franco arcilloso <b>Agregados:</b> bloques angulares y subangulares, prismas y todos los tamaños <b>Poros:</b> vesiculares <b>Raíces:</b> finas y muy finas, pocas <b>Tamaño:</b> finos <b>Frecuencia:</b> abundantes <b>Continuidad:</b> no conectados
Bt	34-44	<b>Textura:</b> franco arenoso <b>Agregados:</b> bloques angulares y subangulares, todos los tamaños <b>Poros:</b> vesiculares y tubulares <b>Raíces:</b> frecuentes fina y muy finas <b>Tamaño:</b> muy finos <b>Frecuencia:</b> frecuente <b>Coninuidad:</b> conectados y no conectados Presencia de moteo (Rojizo y oscuro)
Bt2	44-52	<b>Textura:</b> franco arenoso <b>Agregados:</b> bloques de todos los tamaños subangulares <b>Poros:</b> vesiculares y tubulares <b>Raíces:</b> muy finas y abundantes <b>Frecuencia:</b> abundante <b>Continuidad:</b> conectados y no conectados <b>Tamaño:</b> todos los tamaños
C	52_76x	<b>Textura:</b> franco arenoso <b>Agregados:</b> bloques subangulares y prisma <b>Poros:</b> vesiculares y tubulares <b>Raíces:</b> muy finas y pocas <b>Tamaño:</b> gruesos y muy grueso <b>Frecuencia</b> abundante <b>Cont:</b> conectados y no conectados <b>Tamaño:</b> todos los tamaños



## Anexo F

*Calicatas lote La "L", Unidad de Ganado de Carne, área subsolada*

Perfil No: 2  
 Fecha de descripción: 11/03/22  
 Ubicación: La "L"  
 Descrita por: Balcárcel y Moreno  
 Posición Geomorfológica: Terraza media  
 Pendiente: 0 – 2 %, plano  
 Precipitación anual: 1100 mm  
 Temperatura media anual: 24°C  
 Uso de tierra: Ganadería pastoreo  
 Cultivo: Pastura Mombaza, seco.  
 Drenaje natural: Pobre a moderado  
 Erosión: No  
 Humedad del suelo: Punto de Marchitez  
 Régimen de humedad: Ústico  
 Régimen de temperatura: Isohipertérmico



Horizonte	Profundidad (cm)	Caracterización
Ap	0-15	<b>Textura:</b> Arcilloso <b>Agregados:</b> bloques angulares, subangulares, prismas subangulares y angulares. <b>Poros:</b> tubulares <b>Raíces:</b> abundantes de todos los tamaños <b>Tamaño:</b> fino, muy fino, gruesos y muy gruesos <b>Frecuencia:</b> abundantes <b>Continuidad:</b> no conectados y conectados Primer horizonte compactado
C	15-27	<b>Textura:</b> franco arcilloso <b>Agregados:</b> angulares y prismas <b>Poros:</b> vesiculares tubulares <b>Raíces:</b> frecuentes de todos los tamaños <b>Tamaño:</b> finos <b>Frecuencia:</b> frecuentes <b>Continuidad:</b> conectados y no conectados Presencia de moteo naranja brillante (óxido)
Cg	27-52	<b>Textura:</b> Arcilloso <b>Agregados:</b> bloques de todos los tamaños, angulares y prismas <b>Poros:</b> vesiculares, tubulares y planares <b>Raíces:</b> muy finas escasas <b>Frecuencia:</b> abundante <b>Continuidad:</b> conectados y no conectados <b>Tamaño:</b> todos los tamaños
C2	52-70	<b>Textura:</b> Arcilloso <b>Agregados:</b> bloques de todos los tamaños angulares y primas <b>Poros:</b> tubulares y planares <b>Raíces:</b> muy finas escasas <b>Frecuencia:</b> abundante <b>Continuidad:</b> conectados y no conectados <b>Tamaño:</b> todos los tamaños <b>Forma:</b> vesiculares y tubular

### Anexo G

*Calicata lote La "L", Unidad de Ganado de Carne, área subsolada*

Perfil No:	3
Fecha de descripción:	13/03/22
Ubicación:	La "L"
Descrita por:	Balcárcel y Moreno
Posición Geomorfológica:	Terraza media
Pendiente:	0 – 2 %, plano
Precipitación anual:	1100 mm
Temperatura media anual:	24°C
Uso de tierra:	Ganadería pastoreo
Cultivo:	Pastura Mombaza, seco.
Drenaje natural:	Pobre a moderado
Erosión:	No
Humedad del suelo:	Punto de Marchitez
Régimen de humedad:	Ústico
Régimen de temperatura:	Isohipertérmico



Horizonte	Profundidad (cm)	Caracterización
Ap	0-15	<b>Textura:</b> franco arcilloso <b>Agregados:</b> bloques angulares y subangulares finos medianos gruesos <b>Poros:</b> vesiculares <b>Raíces:</b> abundantes de todos los tamaños <b>Tamaño:</b> todos los tamaños. <b>Continuidad:</b> conectados y no conectados
Bt	15-30	<b>Textura:</b> franco arcilloso <b>Agregados:</b> bloques angulares: fino, muy finos, grueso y muy grueso. <b>Poros:</b> vesiculares y tubulares <b>Continuidad:</b> conectados y no conectado <b>Raíces:</b> frecuentes y finas
C	30-47	<b>Textura:</b> franco arcilloso <b>Agregados:</b> bloques angulares, muy gruesos <b>Poros:</b> vesiculares y tubular <b>Raíces:</b> muy finas escasas <b>Frecuencia:</b> abundante <b>Continuidad:</b> conectados y no conectados <b>Tamaño:</b> todos los tamaños
C2	47-70X	<b>Textura:</b> franco arcilloso <b>Agregados:</b> bloques de todos los tamaños subangulares <b>Poros:</b> vesiculares y tubular <b>Raíces:</b> muy finas escasas <b>Frecuencia:</b> abundante <b>Continuidad:</b> conectados y no conectados <b>Tamaño:</b> todos los tamaños

## Anexo H

*Calicata lote La "L", Unidad de Ganado de Carne, área subsolada*

Perfil:	4
Fecha de descripción:	13/03/22
Ubicación:	Calicata 4
Descrita por:	Balcárcel y Moreno
Posición Geomorfológica:	Terraza media
Pendiente:	0 – 2 %, plano
Precipitación anual:	1100 mm
Temperatura media anual:	24°C
Uso de tierra:	Ganadería pastoreo
Cultivo:	Pastura Mombaza, seco
Drenaje natural:	Pobre a moderado
Erosión:	No
Humedad del suelo:	Punto de marchitez
Régimen de humedad:	Ústico
Régimen de temperatura:	Isohipertérmico



Horizonte	Profundidad (cm)	Caracterización
Ap	0-22	<b>Textura:</b> franco arcilloso <b>Agregados:</b> bloques angulares, medianos y gruesos <b>Poros:</b> tubulares y vesiculares <b>Tamaño:</b> todos los tamaños <b>Raíces:</b> todos los tamaños
Bt	22-30	<b>Textura:</b> franco arcilloso <b>Agregados:</b> bloques angulares Fuertes, medianos y gruesos <b>Poros:</b> tubulares y vesiculares <b>Tamaño:</b> todos los tamaños <b>Raíces:</b> de todos los tamaños
Bt2	30-45	<b>Textura:</b> franco arcilloso <b>Agregados:</b> bloques angulares y subangulares, todos tamaños. <b>Poros:</b> tubulares <b>Frecuencia:</b> abundantes <b>Raíces:</b> pocas y finas
C	40-70x	<b>Textura:</b> franco arenoso <b>Agregados:</b> bloques angulares y subangulares, todos tamaños. <b>Poros:</b> tubulares <b>Tamaño:</b> todos los tamaños <b>Raíces:</b> Pocas y finas

## Anexo I

*Calicata lote lote Zorralles 6, Unidad de Ganado Lechero, área subsolada*

Perfil No: 1  
 Fecha de descripción: 22/03/22  
 Ubicación: Zorralles 6  
 Descrita por: Balcárcel y Moreno  
 Posición Geomorfológica: Terraza baja  
 Pendiente: 0 – 2 %, plano  
 Precipitación anual: 1100 mm  
 Temperatura media anual: 24 °C  
 Uso de tierra: Ganadería pastoreo  
 Cultivo: Pastura Tobiata, seco  
 Drenaje natural: Buen drenaje  
 Erosión: No se observa  
 Humedad del suelo: Punto de marchitez  
 Régimen de humedad: Ústico  
 Régimen de temperatura: Isohipertérmico



Horizonte	Profundidad (cm)	Caracterización
Ap	0-13	<b>Textura:</b> franco <b>Agregados:</b> prismas <b>Poros:</b> angulares y subangulares vesiculares <b>Tamaño:</b> todos los tamaños <b>Raíces:</b> pocas finas y muy finas <b>Frecuencia:</b> frecuentes <b>Continuidad:</b> no conectados y conectados
C	13-29	<b>Textura:</b> franco <b>Agregados:</b> angulares, subangulares, gruesos, medios, todos los tamaños <b>Raíces:</b> muy finas, poco frecuentes <b>Poros:</b> vesicular y tubular <b>Tamaño:</b> todos los tamaños <b>Frecuencia:</b> abundante <b>Continuidad:</b> Conectados y no conectados Presencia de moteo
C2	29-40	<b>Textura:</b> franco arenoso <b>Agregados:</b> bloques angulares, angulares y subangulares <b>Raíces:</b> pocas y muy finas <b>Poros:</b> vesicular y tubular <b>Frecuencia:</b> abundantes <b>Continuidad:</b> conectado y no conectado <b>Tamaño:</b> todos los tamaños Presencia de moteo
C3	40-59	<b>Textura:</b> franco arenoso <b>Agregados:</b> bloques angulares, prisma, tubulares, vesiculares y de todos los tamaños <b>Poros:</b> vesicular y tubular <b>Continuidad:</b> conectados y no conectados <b>Frecuencia:</b> abundantes <b>Raíces:</b> pocas y muy finas Presencia de moteo naranja

## Anexo J

*Calicata lote lote Zorrales 6, Unidad de Ganado lechero, área subsolada*

Perfil No: 2  
 Fecha de descripción: 23/3/22  
 Ubicación: Zorrales 6  
 Descrita por: Balcárcel y Moreno  
 Posición Geomorfológica: Terraza baja  
 Pendiente: 0 – 2 %, plano  
 Precipitación anual: 1100 mm  
 Temperatura media anual: 24°C  
 Uso de tierra: Ganadería pastoreo  
 Cultivo: Pastura Tobiatá, seco.  
 Muy viejo (sf)  
 Drenaje natural: Pobre a moderado  
 Erosión: No  
 Régimen de humedad: Ústico  
 Régimen de temperatura: Isohipertérmico



Horizonte	Profundidad (cm)	Caracterización
Ap	0-15	<b>Textura:</b> franco <b>Agregados:</b> bloques angulares subangulares, todos los tamaños <b>Raíces:</b> frecuentes y de todos los tamaños <b>Poros:</b> vesiculares y tubulares <b>Tamaño:</b> todos los tamaños <b>Continuidad:</b> conectados y no conectados <b>Frecuencia:</b> frecuentes
Bw	15-32	<b>Textura:</b> franco <b>Agregados:</b> bloques angulares y subangulares <b>Poros:</b> vesicular y tubulares <b>Tamaño:</b> todos los tamaños <b>Continuidad:</b> conectados y no conectados <b>Raíces:</b> frecuentes y de todos los tamaños
C	32-50	<b>Textura:</b> franco <b>Agregados:</b> bloques angulares y subangulares <b>Raíces:</b> de todos los tamaños frecuentes <b>Poros:</b> vesicular y tubular <b>Frecuencia:</b> frecuentes <b>Continuidad:</b> conectados y no conectados
C2	50-70x	<b>Textura:</b> franco arcilloso <b>Agregados:</b> bloques angulares <b>Poros:</b> vesiculares <b>Frecuencia:</b> pocos <b>Tamaño:</b> muy finos <b>Raíces:</b> muy finas y frecuentes Presencia de moteo



## Anexo K

*Calicata lote Zorrales 6, Unidad de Ganado lechero, área subsolada*

Perfil No: 3  
 Fecha de descripción: 24/03/22  
 Ubicación: Zorrales 6  
 Descrita por: Balcarcel y Moreno  
 Posición Geomorfológica: Terraza baja  
 Pendiente: 0 – 2 %, plano  
 Precipitación anual: 1100 mm  
 Temperatura media anual: 24°C  
 Uso de tierra: Ganadería pastoreo  
 Cultivo: Pastura Tobiatá, seco  
 Drenaje natural: Pobre  
 Erosión: No  
 Humedad del suelo: Punto de marchitez  
 Erosión: No  
 Régimen de humedad: Ústico  
 Régimen de temperatura: Isohipertérmico



Horizonte	Profundidad (cm)	Caracterización
Ap	0-23	<b>Textura:</b> franco arcilloso <b>Agregados:</b> primas, bloques angulares y de todos los tamaños. <b>Poros:</b> planares y tubulares <b>Continuidad:</b> conectados y no conectados. <b>Raíces:</b> abundantes de todos los tamaños Presencia de moteado naranja
E	23-40	<b>Textura:</b> franco arcilloso <b>Agregados:</b> bloques angulares y subangulares y prismas. <b>Poros:</b> escasos y tubulares <b>Continuidad:</b> conectados y no conectados <b>Tamaño:</b> medios, gruesos y muy gruesos <b>Raíces:</b> frecuentes finas, muy finos, medios
Bt	40-70x	<b>Textura:</b> arcilloso <b>Agregados:</b> prismas angulares, medianos, grandes y muy grandes. <b>Poros:</b> planares <b>Continuidad:</b> conectados y no conectados <b>Raíces:</b> pocas finas y muy finas

## Anexo L

*Calicata lote lote La L, Unidad de Ganado de Carne, área sin subsoleo*

Perfil No:	1
Fecha de descripción:	27/03/22
Ubicación:	La "L" (control)
Descrita por:	Balcárcel y Moreno
Posición Geomorfológica:	Terraza media
Pendiente:	0 – 2 %, plano
Precipitación anual:	1100 mm
Temperatura media anual:	24°C
Uso de tierra:	Ganadería pastoreo
Cultivo:	Pastura Mombaza, seco
Drenaje natural:	Moderado
Erosión:	No
Humedad del suelo:	Punto de marchitez
Régimen de humedad:	Ústico
Régimen de temperatura:	Isohipertérmico



Horizonte	Profundidad (cm)	Caracterización
Ap1	0-7	<b>Agregados:</b> bloques subangulares, finos, muy finos y medios <b>Raíces:</b> abundantes y todos los tamaños <b>Poros:</b> finos y muy finos <b>Frecuentes:</b> abundantes <b>Forma:</b> vesiculares y tubulares <b>Continuidad:</b> conectados y no conectados
Ap2	7-25	<b>Agregados:</b> bloques angulares de todos los tamaños, prisma <b>Poros:</b> todos los tamaños <b>Frecuentes:</b> finos y muy finos <b>Forma:</b> vesiculares y tubulares <b>Continuidad:</b> conectados y no conectados
Bw	25-47	<b>Agregados:</b> bloques angulares y subangulares <b>Raíces:</b> pocas finas <b>Poros:</b> vesiculares y tubulares <b>Frecuencia:</b> abundantes <b>Tamaño:</b> todos los tamaños <b>Forma:</b> vesiculares y tubulares <b>Continuidad:</b> conectados y no conectados
C	47-62	<b>Agregados:</b> bloques angulares y subangulares de todos los tamaños <b>Raíces:</b> finas y muy finas frecuentes <b>Poros:</b> vesiculares y tubulares <b>Tamaño:</b> todos los tamaños <b>Frecuencia:</b> abundantes <b>Continuidad:</b> conectados y no conectados Presencia de moteo
C2	62-80x	<b>Agregados:</b> bloques angulares <b>Poros:</b> vesiculares y escasos <b>Raíces:</b> ausentes <b>Continuidad:</b> conectados y no conectados

## Anexo M

*Calicata lote lote La L, Unidad de Ganado de Carne, área sin subsoleo*

Perfil No:	2
Fecha de descripción:	28/03/22
Ubicación:	La "L" (control)
Descrita por:	Balcárcel y Moreno
Posición Geomorfológica:	Terraza media
Pendiente:	0 – 2 %, plano
Precipitación anual:	1100 mm
Temperatura media anual:	24°C
Uso de tierra:	Ganadería pastoreo
Cultivo:	Pastura, Mombaza seco
Drenaje natural:	Buen drenaje
Humedad del suelo:	Punto de marchitez
Erosión:	No
Régimen de humedad:	Ústico
Régimen de temperatura:	Isohipertérmico



Horizonte	Profundidad (cm)	Caracterización
Ap	0-8	<b>Textura:</b> franco arenoso <b>Agregados:</b> bloques subangulares finos, muy finos, medios <b>Raíces:</b> abundantes todos los tamaños <b>Poros:</b> muy finos, vesiculares y tubulares <b>Frecuencia:</b> abundantes <b>Continuidad:</b> conectados y no conectados
Ap2	8-20	<b>Textura:</b> franco arenoso <b>Agregados:</b> angulares de todos los tamaños, prisma <b>Poros:</b> finos <b>Frecuencia:</b> frecuentes <b>Forma:</b> vesiculares y tubulares <b>Continuidad:</b> conectados y no conectados
Bt	20-39	<b>Textura:</b> franco arcillo arenoso <b>Agregados:</b> angulares y subangulares <b>Raíces:</b> pocas y finas <b>Poros:</b> vesiculares y tubulares <b>Frecuencia y tamaño:</b> frecuentes y de todos los tamaños <b>Continuidad:</b> conectados y no conectados
C	39-55	<b>Textura:</b> franco arcillo arenoso <b>Agregados:</b> bloques angulares y subangulares, de todos los tamaños. <b>Raíces:</b> finas y muy finas frecuentes <b>Poros:</b> vesiculares y tubulares <b>Tamaño:</b> todos los tamaños <b>Continuidad:</b> conectados y no conectados Presencia de moteo
C2	55-75x	<b>Textura:</b> franco arcillo arenoso <b>Agregados:</b> angulares <b>Raíces:</b> ausentes <b>Poros:</b> vesiculares y escasos



## Anexo N

*Calicata lote Los Mingos, Unidad de Ganado de Carne, área sin subsole*

Perfil No: 1  
 Fecha de descripción: 04/03/22  
 Ubicación: Los Mingos (control)  
 Descrita por: Balcárcel y Moreno  
 Posición Geomorfológica: Terraza baja  
 Pendiente: 0 – 3%, plano  
 Precipitación anual: 1100 mm  
 Temperatura media anual: 24°C  
 Uso de tierra: Ganadería pastoreo  
 Cultivo: Pastura Tobiatá, seco  
 Drenaje natural: Buen drenaje  
 Erosión: No  
 Humedad del suelo: Punto de Marchitez  
 Régimen de humedad: Ústico  
 Régimen de temperatura: Isohipertérmico



Horizonte	Profundidad (cm)	Caracterización
Ap	0 – 5	<b>Textura:</b> franco arenoso <b>Agregados:</b> migajoso, finos, muy finos, medios <b>Poros:</b> vesiculares <b>Tamaño:</b> todos los tamaños <b>Frecuencia:</b> abundante <b>Conectados:</b> no conectados <b>Raíces:</b> abundantes y de todos los tamaños
Ap2	5-19	<b>Textura:</b> franco arenoso <b>Agregados:</b> migajoso, fino, medios y gruesos <b>Poros:</b> vesiculares <b>Raíces:</b> abundantes de todos los tamaños <b>Tamaño:</b> finos <b>Frecuencia:</b> frecuentes <b>Continuidad:</b> no conectados
Bw	19-28	<b>Textura:</b> franco arenoso <b>Agregados:</b> muy fino, fino, mediano y grueso <b>Poros:</b> vesiculares <b>Raíces:</b> frecuentes finas y muy finas <b>Tamaño:</b> medios <b>Frecuencia:</b> frecuentes <b>Continuidad:</b> no conectados
Cg	28-39X	<b>Textura:</b> franco <b>Agregados:</b> muy finos, finos, medios, gruesos, muy gruesos angulares y angulares <b>Poros:</b> vesiculares <b>Raíces:</b> frecuentes finas y muy finas <b>Tamaño:</b> medios <b>Frecuencia:</b> frecuentes <b>Continuidad:</b> no conectados

## Anexo O

*Calicata lote Los Mingos, Unidad de Ganado de Carne, sin subsuelo*

Perfil No: 2  
 Fecha de descripción: 05/03/22  
 Ubicación: Los Mingos (control)  
 Descrita por: Balcárcel y Moreno  
 Posición Geomorfológica: Terraza baja  
 Pendiente: 0 – 3 %, plano  
 Precipitación anual: 1100 mm  
 Temperatura media anual: 24°C  
 Uso de tierra: Ganadería pastoreo  
 Cultivo: Pastura Tobiata, seco  
 Drenaje natural: Buen drenaje  
 Erosión: No  
 Humedad del suelo: Punto de marchitez  
 Régimen de humedad: Ústico  
 Régimen de temperatura: Isohipertérmico



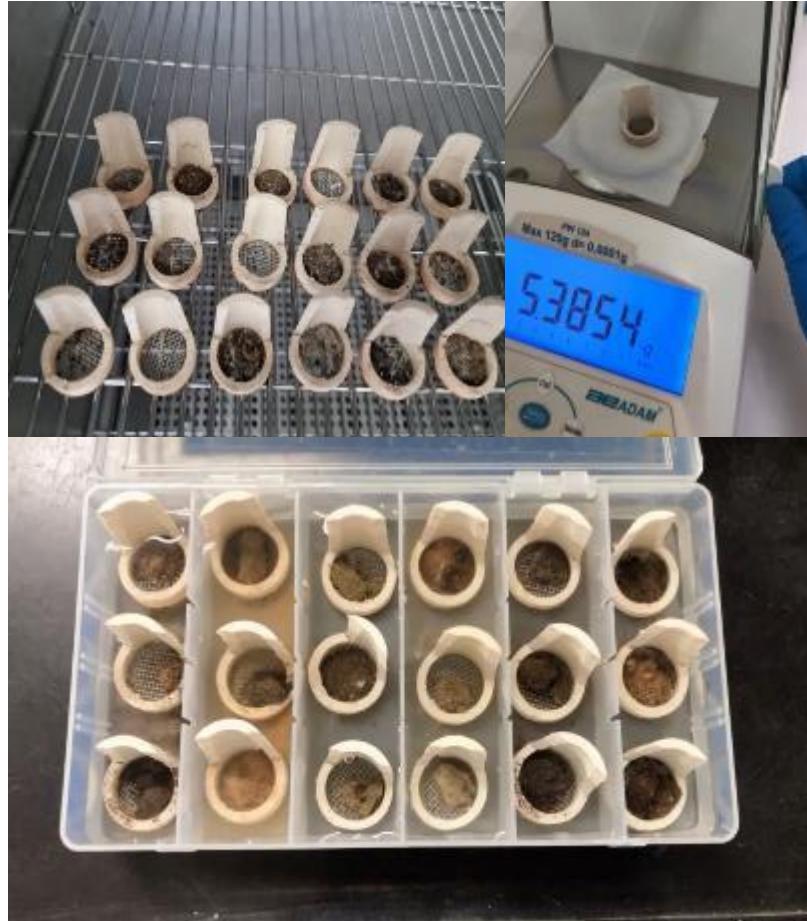
Horizonte	Profundidad (cm)	Caracterización
Ap	0-16	<b>Textura:</b> franco arcilloso <b>Agregados:</b> bloques gruesos, muy gruesos y medianos (angulares y subangulares) <b>Poros:</b> tubulares y vesiculares y todos los tamaños abundantes <b>Raíces:</b> <b>Tamaño:</b> todos los tamaños <b>Frecuencia:</b> frecuentes <b>Continuidad:</b> no conectados Presencia de moteo
Ap2	16-27	<b>Textura:</b> franco <b>Agregados:</b> finos, medios. Gruesos y muy grueso, angulares y subangulares <b>Poros:</b> tubulares y vesiculares <b>Raíces:</b> frecuentes <b>Tamaño:</b> medianos y finos <b>Frecuencia:</b> frecuentes <b>Continuidad:</b> conectados y no conectados
Bt	27-38	<b>Textura:</b> franco arcilloso <b>Agregados:</b> prismático muy fino, muy grueso, grueso, medios, subangulares y angulares <b>Poros:</b> vesiculares y tubulares <b>Tamaño:</b> medianos y finos <b>Frecuencia:</b> frecuente <b>Continuidad:</b> conectados y no conectados <b>Raíces:</b> frecuentes fina y muy finas Presencia de moteo
Bt2	38-49	<b>Textura:</b> franco <b>Agregados:</b> bloques angulares y subangulares, finos, medios, gruesos y muy gruesos, muy finos, finos y medianos. <b>Poros:</b> vesiculares y tubular <b>Raíces:</b> pocas <b>Frecuencia:</b> pocos <b>Continuidad:</b> no conectados <b>Tamaño:</b> finos y medianos
C	49-90X	<b>Textura:</b> franco <b>Agregados:</b> muy finos, finos, medios, gruesos y muy gruesos. <b>Raíces:</b> pocas

		<b>Poros:</b> finos y medianos <b>Frecuencia:</b> pocos <b>Continuidad:</b> conectado y no conectado
--	--	--

**Anexo P**

*Procedimiento de estimación de clases texturales con densímetro (método de Bouyoucos)*



**Anexo Q***Método de estimación de estabilidad de los agregados*

**Anexo R**

*Método de la probeta para estimación de (densidad aparente, densidad real y porosidad)*

