



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO  
DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS AGROPECUARIAS



**DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA LÁMINA DE AGUA DE  
RIEGO ALMACENADA EN UN SUELO GLEYSOL, CON USO  
DE LOS SIG**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO AGRÓNOMO**

PRESENTA:

MANUEL DAVID SOSA GARCÍA

DIRECTOR

DR. MAXIMIANO ANTONIO ESTRADA BOTELLO

CO-DIRECTOR

DR. RUFO SÁNCHEZ HERNÁNDEZ

VILLAHERMOSA, TABASCO

13 DE DICIEMBRE DE 2024

### **Declaración de Autoría y Originalidad**

En la Ciudad de Villahermosa, el día 08 del mes de Noviembre del año 2024, el que suscribe Manuel David Sosa García alumno del Programa de Ingeniería en Agronomía con número de matrícula 182C25001, adscrito a la División Académica de Ciencias Agropecuarias, de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, como autor de la Tesis presentada para la obtención del título de Ingeniero Agrónomo y titulada **“Distribución espacial de la lámina de agua de riego almacenada en un suelo Gleysol, con uso de los SIG”** dirigida por el Dr. Maximiano Antonio Estrada Botello y el Dr. Rufo Sánchez Hernández.

#### **DECLARO QUE:**

La Tesis es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la LEY FEDERAL DEL DERECHO DE AUTOR (Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Ley Federal del Derecho de Autor del 01 de Julio de 2020 regularizando y aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita.

Del mismo modo, asumo frente a la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad o contenido de la Tesis presentada de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente.

Villahermosa, Tabasco a 17 de septiembre de 2024.



**Manuel David Sosa García**

**182C25001**



**UJAT**

UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO

“ ESTUDIO EN LA DUDA, ACCIÓN EN LA FE ”



División Académica de  
Ciencias Agropecuarias

Coordinación de  
Estudios Terminales



2024

Felipe Carrillo  
PUERTO  
GOBIERNO DEL ESTADO DE TABASCO  
MEXICO

**Asunto:** Autorización de impresión  
de Trabajo Recepcional.  
**Fecha:** 16 de octubre de 2024.

**LIC. MARIBEL VALENCIA THOMPSON**  
**JEFA DEL DEPARTAMENTO DE CERTIFICACIÓN Y**  
**TITULACIÓN DE LA UJAT.**  
**P R E S E N T E**

Por este conducto y de acuerdo a la solicitud correspondiente por parte del interesado(a), le informo que, con base en el artículo 113 del *Reglamento de Titulación para Egresados de Licenciatura y Técnico Superior Universitario*, la Dirección a mi cargo **autoriza al C. Manuel David Sosa García**, con matrícula **182C25001** egresado(a) de la Licenciatura de **Ingeniería en Agronomía** de la División Académica de Ciencias Agropecuarias, la impresión de su Trabajo Recepcional bajo la modalidad de Tesis, titulado: **“DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA LÁMINA DE AGUA DE RIEGO ALMACENADA EN UN SUELO GLEYSOL, CON USO DE LOS SIG”**.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**

**M.V.Z. JORGE ALFREDO THOMAS TELLEZ**  
**DIRECTOR**



U.J.A.T.  
DIVISIÓN ACADÉMICA DE  
CIENCIAS AGROPECUARIAS  
DIRECCIÓN

C.c.p. Archivo

Km 25, Carret. Villahermosa-Teapa  
Ra. La Huasteca, 2ª Sección, 86298, Centro, Tabasco, México  
Tel. (+52 993) 3581500 ext. 6614  
Correo electrónico: [terminales.daca@ujat.mx](mailto:terminales.daca@ujat.mx)

[www.ujat.mx](http://www.ujat.mx)

## Carta De Cesión de Derechos

Villahermosa, Tabasco a 08 de noviembre de 2024.

Por medio de la presente manifiesto haber colaborado como AUTOR en la producción, creación y/o realización de la obra denominada **“Distribución espacial de la lámina de agua de riego almacenada en un suelo Gleysol, con uso de los SIG”**.

Con fundamento en el artículo 83 de la Ley Federal del Derecho de Autor y toda vez que, la creación y/o realización de la obra antes mencionada se realizó bajo la comisión de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco; entiendo y acepto el alcance del artículo en mención, de que tengo el derecho al reconocimiento como autor de la obra, y la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco mantendrá en un 100% la titularidad de los derechos patrimoniales por un período de 20 años sobre la obra en la que colaboré, por lo anterior, cedo el derecho patrimonial exclusivo en favor de la Universidad.

**COLABORADOR**



Manuel David Sosa García

**TESTIGOS**

  
\_\_\_\_\_

Dr. Maximiano Antonio Estrada Botello

  
\_\_\_\_\_

Dr. Rufo Sánchez Hernández

## **Dedicatoria**

A Dios, por darme el entendimiento y guía a lo largo de la carrera universitaria, asimismo por poner en mi camino a personas extraordinarias que fueron instrumento en mi aprendizaje.

A mis padres, por estar siempre presentes y atentos, por la apoyarme ampliamente en mis estudios, por todo el esfuerzo y sacrificio que han puesto para darme las oportunidades que ellos no tuvieron, por inculcarme valores, en general por ser un ejemplo a seguir en mi vida.

A mis hermanos, por instruirme y guiarme cada ocasión que fue necesario, por haber establecido un estándar alto a nivel estudiantil y demostrarme que con esfuerzo y perseverancia es posible el desarrollo profesional.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.

## **Agradecimientos**

Al Dr. Maximiano Antonio Estrada Botello, por apoyarme incondicionalmente en el desarrollo de la tesis, por estar siempre dispuesto a discutir ideas y aportar conocimiento.

Al laboratorio de suelos y plantas de la División Académica de Ciencias Agropecuarias por conceder el acceso y proporcionar el material y equipo necesario para el desarrollo de la investigación, así como proporcionar orientación técnica siempre que fue requerida.

A la finca “Bananera La Victoria” por abrirnos las puertas y permitirnos la realización del muestreo de suelos en sus confines.

Al proyecto “Requerimientos hídricos del cultivo de Banano en dos plataneras del Municipio de Teapa, Tabasco” con clave UJAT-20221158.

A la comisión revisora de esta Tesis, conformada por los profesores Dr. Juan de Dios Mendoza Palacios, Dr. Jorge Tetumo García, Dr. José Armando León Nájera, Dr. Edmundo Gómez y Dr. José Manuel Salaya Domínguez Méndez, quienes se comprometieron en ser orientadores para la correcta redacción y articulación de esta tesis.

## ÍNDICE

Resumen .....	6
Abstrac .....	7
I. Introducción .....	8
II. Marco teórico .....	10
2.1. Los Suelos de Tabasco .....	10
2.1.1. Clasificación .....	10
2.1.2. Propiedades físicas .....	11
2.2. Lámina de agua almacenada en un suelo .....	14
2.2.1. Componentes del sistema suelo .....	14
2.2.2. Expresiones de humedad del suelo .....	15
2.2.3. Lámina de riego .....	21
2.3. Variabilidad espacial .....	21
2.3.1. Concepto .....	21
2.3.2. Importancia .....	21
2.3.3. La variabilidad espacial en los suelos .....	22
2.4. Los Sistemas de información geográfica .....	22
2.4.1. Importancia de los SIG .....	23
2.4.2. Aplicación de los SIG en la agricultura .....	23
2.4.3. Los SIG en el riego agrícola .....	24
III. Justificación .....	25
IV. Pregunta de investigación .....	26
V. Hipótesis .....	28
VI. Objetivos .....	28
6.1. Objetivo general .....	28
6.2. Objetivos específicos .....	28
VII. Metodología .....	29
7.1. Localización del área de estudio .....	29
7.2. Muestreos de suelos .....	30
7.3. Determinación de variables .....	31
7.3.1 La textura .....	31
7.3.2 Densidad aparente .....	31
7.3.3 Capacidad de campo .....	31

7.3.4	Punto de marchitez permanente .....	32
7.3.5	Humedad a saturación.....	32
7.3.6	Cálculo del porcentaje de humedad para CC, PMP, Psat.....	32
7.3.7	Lamina de almacenamiento .....	33
7.5.	Construcción de mapas .....	34
7.6.	Análisis estadístico .....	34
VIII	Resultados y discusión .....	35
8.1.	Densidad aparente .....	35
8.2.	Textura .....	36
8.2.1.	Arena .....	37
8.2.2.	Limo .....	39
8.2.3.	Arcilla .....	40
8.3.	Parámetros de humedad del suelo .....	41
8.3.1.	Punto de marchitez permanente .....	41
8.3.2.	Capacidad de campo .....	42
8.3.3.	Porcentaje de humedad a saturación.....	44
8.4.	Láminas de almacenamiento de agua .....	45
8.5.	Distribución espacial de las propiedades del suelo.....	46
8.6	Semivariogramas.....	52
8.6.1.	Propiedades físicas del suelo.....	52
8.6.2.	Láminas de agua almacenadas.....	55
IX	Conclusión.....	58
X	Referencias citadas .....	59
XI	Anexos .....	71

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación esquemática del contenido de sólidos, líquidos y gases.....	14
Figura 2. Clases de agua disponible para los vegetales y características del drenaje.....	15
Figura 3. Eficiencias estimadas para períodos temporales promedio y periodos de uso máximo de agua.....	20
Figura 4. Localización del área de estudio .....	29
Figura 5. Ubicación de los puntos de muestreo .....	30

## ÍNDICE DE FIGURAS ANEXO

Figura 1A. Mapa de distribución de densidad aparente.....	71
Figura 2A. Mapa de distribución de la textura del suelo.....	72
Figura 3A. Mapa de distribución de partículas de arena.....	73
Figura 4A. Mapa de distribución de partículas de limo.....	74
Figura 5A. Mapa de distribución de partículas de arcilla.....	75
Figura 6A. Mapa de distribución de punto de marchitez permanente.....	76
Figura 7A. Mapa de distribución de capacidad de campo.....	77
Figura 8A. Mapa de distribución de humedad a saturación.....	78
Figura 9A. Mapa de distribución de láminas de punto de marchitez permanente, capacidad de campo y humedad a saturación.....	79
Figura 10A. Mapa de distribución de lámina de reposición.....	80
Figura 11A. Mapa de distribución de lámina de punto de marchitez permanente.....	81
Figura 12A. Mapa de distribución de lámina de capacidad de campo.....	82
Figura 13A. Mapa de distribución de lámina de humedad a saturación.....	83
Figura 14A. Mapa de distribución de lámina de reposición (100%) por profundidad.....	84
Figura 15A. Semivariograma del parámetro densidad aparente, profundidad 0-30 cm.....	85
Figura 16A. Semivariograma del parámetro densidad aparente, profundidad 30-60 cm.....	85
Figura 17A. Semivariograma del parámetro densidad aparente, profundidad 60-90 cm.....	85
Figura 18A. Semivariograma del parámetro arena, profundidad 0-30 cm.....	86
Figura 19A. Semivariograma del parámetro arena, profundidad 30-60 cm.....	86
Figura 20A. Semivariograma del parámetro arena, profundidad 60-90 cm.....	86
Figura 21A. Semivariograma del parámetro limo, profundidad 0-30 cm.....	87
Figura 22A. Semivariograma del parámetro limo, profundidad 30-60 cm.....	87

Figura 23A. Semivariograma del parámetro limo, profundidad 60-90 cm.....	87
Figura 24A. Semivariograma del parámetro arcilla, profundidad 0-30 cm.....	88
Figura 25A. Semivariograma del parámetro arcilla, profundidad 30-60 cm.....	88
Figura 26A. Semivariograma del parámetro arcilla, profundidad 60-90 cm.....	88
Figura 27A. Semivariograma del parámetro punto de marchitez permanente, 0-30 cm.....	89
Figura 28A. Semivariograma del parámetro punto de marchitez permanente, 30-60 cm.....	89
Figura 29A. Semivariograma del parámetro punto de marchitez permanente, 60-90 cm. ....	89
Figura 30A. Semivariograma del parámetro capacidad de campo, profundidad 0-30 cm.....	90
Figura 31A. Semivariograma del parámetro capacidad de campo, profundidad 30-60 cm.....	90
Figura 32A. Semivariograma del parámetro capacidad de campo, profundidad 60-90 cm.....	90
Figura 33A. Semivariograma del parámetro humedad a saturación, profundidad 0-30 cm....	91
Figura 34A. Semivariograma del parámetro humedad a saturación, profundidad 30-60 cm...	91
Figura 35A. Semivariograma del parámetro humedad a saturación, profundidad 60-90 cm...	91
Figura 36A. Semivariograma de lámina de punto de marchitez permanente, 0-90 cm.....	92
Figura 37A. Semivariograma de lámina de capacidad de campo, profundidad 0-90 cm.....	92
Figura 38A. Semivariograma de lámina de humedad a saturación, profundidad 0-90 cm.....	92
Figura 39A. Semivariograma de lámina de capacidad de campo, profundidad 0-30 cm.....	93
Figura 40A. Semivariograma de lámina de capacidad de campo, profundidad 30-60 cm.....	93
Figura 41A. Semivariograma de lámina de capacidad de campo, profundidad 0-30 cm.....	93
Figura 42A. Semivariograma de lámina de punto de marchitez permanente, profundidad 0-30 cm.....	94
Figura 43A. Semivariograma de lámina de punto de marchitez permanente, profundidad 30-60 cm.....	94
Figura 44A. Semivariograma de lámina de punto de marchitez permanente, profundidad 60-90 cm. ....	94
Figura 45A. Semivariograma de lámina de humedad a saturación, profundidad 0-30 cm.....	95
Figura 46A. Semivariograma de lámina de humedad a saturación, profundidad 30-60 cm....	95
Figura 47A. Semivariograma de lámina de humedad a saturación, profundidad 60-90 cm....	95
Figura 48A. Semivariograma de lámina de reposición (100%), profundidad 0-30 cm.....	96
Figura 49A. Semivariograma de lámina de reposición (100%), profundidad 30-60 cm.....	96
Figura 50A. Semivariograma de lámina de reposición (100%), profundidad 60-90 cm.....	96
Figura 51A. Semivariograma de lámina de reposición.....	97

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Localización de suelos predominantes en Tabasco.....	10
Tabla 2. Grupos de suelos predominantes de Tabasco .....	12
Tabla 3. Densidad aparente de los grupos de suelos predominantes en Tabasco .....	13
Tabla 4. Parámetros de humedad de los grupos de suelos predominantes en Tabasco.....	16
Tabla 5. Resumen de interpolación del parámetro densidad aparente.....	36
Tabla 6. Resumen interpolación del parámetro textura. ....	37
Tabla 7. Resumen interpolación del parámetro arena. ....	38
Tabla 8. Resumen interpolación del parámetro limo. ....	39
Tabla 9. Resumen interpolación del parámetro arcilla.....	41
Tabla 10. Resumen interpolación del parámetro punto de marchitez permanente. ....	42
Tabla 11. Resumen interpolación del parámetro capacidad de campo. ....	43
Tabla 12. Resumen interpolación del parámetro humedad a saturación.....	44
Tabla 13. Resumen interpolación de las láminas de humedad del suelo.....	46
Tabla 14. Estadística descriptiva de los parámetros del suelo en la profundidad 0-30 cm. ....	48
Tabla 15. Estadística descriptiva de los parámetros del suelo en la profundidad 30-60 cm. ....	49
Tabla 16. Estadística descriptiva de los parámetros del suelo en la profundidad 60-90 cm. ....	50
Tabla 17. Estadística descriptiva de las láminas. ....	50
Tabla 18. Estadística descriptiva de láminas de agua almacenada a la profundidad 0-30 cm...51	
Tabla 19. Estadística descriptiva de láminas de agua almacenada a la profundidad 30-60 cm.51	
Tabla 20. Estadística descriptiva de láminas de agua almacenada a la profundidad 60-90 cm.52	
Tabla 21. Características de los modelos de semivariograma en la profundidad 0-30 cm.....52	
Tabla 22. Características de los modelos de semivariograma en la profundidad 30-60 cm.....53	
Tabla 23. Características de los modelos de semivariograma en la profundidad 60-90 cm.....54	
Tabla 24. Características de los modelos de semivariograma de las láminas. ....	56
Tabla 25. Características de los modelos de semivariograma de las láminas de agua almacenada a la profundidad 0-30 cm. ....	56
Tabla 26. Características de los modelos de semivariograma de las láminas de agua almacenada a la profundidad 30-60 cm. ....	57
Tabla 27. Características de los modelos de semivariograma de las láminas de agua almacenada a la profundidad 60-90 cm. ....	57

## DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA LÁMINA DE AGUA DE RIEGO ALMACENADA EN UN SUELO GLEYSOL, CON EL USO DE LOS SIG

### Resumen

El suelo presenta características físicas y químicas variables en el espacio y tiempo; una de ellas es la capacidad de retención de agua, que depende de los parámetros: textura, densidad aparente, punto de marchitez permanente y capacidad de campo. Una herramienta informática para estimar la distribución espacial de los suelos son los Sistemas de Información Geográfica, los cuales permiten la interpolación, clasificación y mapeo de las características del suelo. Por ello, el presente trabajo tuvo como objetivo aplicar los sistemas de información geográfica para mostrar la distribución espacial de la lámina de agua almacenada en un suelo Gleysol en la finca "La Victoria", Teapa, Tabasco. Se realizó un muestreo de grillas sistemático en un el área de 168 ha, donde se tomaron muestras de suelo para conocer la densidad aparente, textura, punto de marchitez permanente, capacidad de campo y humedad a saturación, con base a estas se calcularon láminas de almacenamiento de agua a la profundidad 0-90 cm. Con el software GS+ se determinó el mejor modelo para su interpolación (kriging) y geoestadística, posteriormente en el software QGIS se realizó la clasificación y la composición de los mapas. Se encontró una lámina de almacenamiento hasta el punto a saturación, CC, PMP y de reposición entre CC y PMP en promedio de 63.432, 39.37, 23.99, 15.38 cm respectivamente, los modelos que se ajustaron principalmente fueron los esféricos y gaussianos. Se concluye que las láminas de almacenamiento de agua para el estrato 0-90 cm presentan una distribución espacial no homogénea en el área de estudio de 168 ha de la finca "La Victoria" Teapa, Tabasco.

**Palabras clave:** Lamina de riego, Distribución espacial, Suelo, Sistemas de información geográfica

## Abstrac

The soil has physical and chemical characteristics which change in space and time; one of those is the water retention capacity, that depends on parameters such as texture, bulk density, permanent wilting point and field capacity. A informatic tool used to estimate the soils spatial distribution are the Geographic Information Systems, which allows interpolation processes, classification and soil characteristics mapping. Thus, the purpose of this research was to apply the geographic information systems to show the spatial distribution of the stored water sheet in a Gleysol soil in "La Victoria" farm, Teapa, Tabasco. A sistematic grid sampling was applied over an area of 168 hectares, where soil samples were collected to determine bulk density, texture, permanent wilting point, field capacity and saturation moisture content. Based on these, water storage sheets were calculated for the 0-90 cm of depth. Geostatistics and best interpolation (kriging) model were determined using the GS+ software, subsequently the classification and map composition were done in QGIS software. Water storage sheets up to saturation point, field capacity (FC), permanent wilting point (PWP) and replenishment between FC and PWP with average values of 63.432, 39.37, 23.99, 15.38 cm, respectively, were found. The models that were primaril fitted were Spherical and Gaussian models. It is concluded that water storage sheets for the 0-90 cm of depth have a heterogeneous spatial distribution in the study area of 168 hectares of "La Victoria" farm, Teapa, Tabasco.

Key words: Irrigation sheet, Spatial distribution, Soil, Geographic Information Systems

## I. Introducción

La variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo afecta la distribución uniforme del agua de riego que se aplica en las zonas agrícolas. Mientras que la capacidad de retención de humedad de los suelos repercute en la disponibilidad de agua para los cultivos, así como da bases para el manejo correcto de los recursos hídricos, la gestión del agua de riego y su programación (Jabro et al., 2009); y afecta por consiguiente en la eficiencia de aplicación del agua de riego (Núñez et al., 2020). Para corregir estos problemas, el conocimiento en las áreas que poseen las mismas propiedades físicas, se implementa el uso de modelos computacionales (Best, 2006) que contribuyen a eficientizar el uso y manejo del agua.

Por ello es de importancia conocer los componentes de distribución del agua en forma horizontal y transversal, de ahí que la lámina de agua que un suelo puede retener o almacenar depende de características físicas tales como la textura, capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP), estructura y porosidad, entre otras características (Lince, 2021). Además, la cantidad de agua que un suelo almacena se determina mediante el conocimiento de parámetros como el punto de marchitez permanente, la capacidad de campo y el punto de saturación (Manna et al., 2018). Al respecto, Rodríguez (2009) plantea que el punto de marchitez permanente es cuando el suelo retiene el agua con una energía tan alta que las plantas no pueden tener acceso a ella, significando una marchitez parcial o total debido al estrés hídrico. Por otra parte, Tarjuelo (1991) menciona que la capacidad de campo es un parámetro que indica cuánta agua un suelo puede retener en contra de las fuerzas de la gravedad, y está determinada por factores ligados al tipo de suelo como: textura, estructura, el tipo de arcilla presente, la profundidad del frente húmedo, la humedad inicial y la presencia de capas de distinta textura. Con respecto a la textura de un suelo Márquez (2021) la consideran como la proporción relativa de partículas de arena, limo y arcilla en el suelo que influye en el almacenamiento del agua en el suelo. Aunado a esto, la granulometría de los suelos desempeña una función fundamental en la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo y se correlaciona directamente con la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente (Lince, 2021).

Por lo mencionado, las propiedades físicas de los suelos presentan una variabilidad espacial compleja para cada uno de los tipos de suelos, que son afectadas por las diferentes prácticas de manejo (Roel y Terra, 2006). Para poder determinar la distribución espacial del almacenamiento del agua en el suelo, existen técnicas importantes que ayudan a su conocimiento como los SIG (sistemas de información geográfica); que en la actualidad tienen

importancia para mejorar la producción en las zonas agrícolas, al usar la agricultura de precisión en los requerimientos hídricos de la planta en función de la variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo. Éstos han sido empleados en el área agrícola en la colecta de datos en tiempo real, en el análisis espacial de datos, en la predicción del clima, identificación de infestaciones de plagas, aplicación de nutrientes, entre otros (Yousefi y Razdari, 2015). Además, se han constituido como una herramienta para elaborar planos que contribuyen a la optimización de la producción; por ejemplo, en la precisión de la siembra, dosis de fertilización y monitoreo de la información físico-química del suelo (Canto et al., 2022). Por ello, los SIG pueden ayudar a mejorar la producción agrícola (Barrera et al., 2020) y contribuir a la toma de decisiones en cuanto al manejo de los suelos y la determinación de las láminas de riego.

Sin embargo, en Tabasco, México no se han documentado estudios sobre el empleo de los SIG para la aplicación del riego para los cultivos. Por tal razón, el presente trabajo tiene como objetivo aplicar los sistemas de información geográfica para mostrar la distribución espacial de la lámina de agua almacenada en un suelo Gleysol, en la finca "La Victoria", Teapa, Tabasco.

México. Juárez Autónoma de Tabasco.

## II. Marco teórico

### 2.1. Los Suelos de Tabasco

#### 2.1.1. Clasificación

De acuerdo con Palma et al., (2007) en Tabasco se pueden encontrar alrededor de 14 grupos de suelos según la Base referencial mundial del recurso suelo (WRB), entre los cuales se destacan los gleysoles (ocupan aproximadamente el 22.9% de la superficie), vertisoles (17.5%), fluvisoles (10.8%) y luvisoles (10.8%). Los datos de INIFAP y CONABIO (1995), indican que en el área de estudio se ubican principalmente dos tipos de suelos, gleysoles éutrico y fluvisoles gleyicos. Palma et al., (2007) describen los gleysoles éutrico como suelos que suelen encontrarse en zonas cercanas a los causes de los ríos y arroyos. En cuanto a los fluvisoles gleyicos mencionan son suelos ubicados en vegas de río, que tienden a inundarse temporalmente (Tabla 1).

**Tabla 1**

*Localización de suelos predominantes en Tabasco*

<b>Grupos de suelos predominantes en Tabasco*</b>			
<b>Vertisoles</b>	<b>Gleysoles</b>	<b>Fluvisoles</b>	<b>Luvisoles</b>
Este grupo de suelos se puede encontrar en Huimanguillo, Cárdenas, Centla, Huimanguillo, Cárdenas, Cunduacán, Comalcalco, Jalpa, Nacajuca, Teapa, Tacotalpa, Jalapa, Macuspana, Jonuta, Balancán y Tenosique (Palma et al., 2007).	Huimanguillo, Cárdenas, Paraíso, Centla, Jonuta, Macuspana y en los suelos de las regiones de los Ríos y la Sierra (Palma et al., 2007).	Se pueden encontrar pequeñas áreas en todo el estado a los causes de los ríos y arroyos y en áreas más grandes en los municipios de Cárdenas, Cunduacán y Comalcalco (Palma et al., 2007). En diques naturales de los ríos Teapa, Tacotalpa, Sierra y Pichucalco (Zavala et al., 2011).	En los municipios de Centro, Macuspana y Teapa (Zavala et al., 2011). Centro, Jalapa, Macuspana, Huimanguillo, Emiliano Zapata y Balancán (Palma et al., 2007).

\*Según la Base referencial mundial del recurso suelo (WRB)

### 2.1.2. Propiedades físicas.

Las características físicas de los suelos varían en función del tipo de suelo, su uso, la profundidad a la que se realice el muestreo, entre otros aspectos. Estas características son útiles para fines de clasificación, de riego, toma de decisiones para la realización de prácticas agrícolas, incluso para fines de fertilidad (cálculo de cantidad de suelo por ha), entre otros. Algunas de las características físicas más utilizadas con fines de riego agrícola son la textura y la densidad aparente.

#### a) Textura

La textura es la propiedad física de los suelos que indica la cantidad de partículas presentes en un suelo dependiendo de su tamaño, en otras palabras, la textura indica la cantidad presente de arena, limo y arcilla en un suelo, porcentualmente. Esta propiedad se relaciona directamente con otras propiedades de los suelos tales como la densidad aparente, la porosidad, la velocidad de infiltración y la lámina de agua almacenada (Food and Agriculture Organization [FAO], 2012). Por otra parte, Reichert et al. (2009) afirman que la textura guarda una correlación positiva con el contenido de agua en los suelos, la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente.

En los suelos con altos porcentajes de arcilla la lámina de agua que almacenan es alta, en cambio en los suelos donde la fracción predominante es arena (arenosoles) la lámina de agua almacenada es menor (Costa et al., 2013). En Tabasco predominan 4 tipos de suelos, a los cuales se les puede asociar diferentes tipos de textura (Tabla 2).

**Tabla 2***Grupos de suelos predominantes de Tabasco*

<b>Grupos de suelos predominantes en Tabasco</b>			
<b>Vertisoles</b>	<b>Gleysoles</b>	<b>Fluvisoles</b>	<b>Luvisoles</b>
Arcillosa (López et al., 2007).	Migajón arcillo arenosa a arcillosa (Zavala et al., 2011).  Textura franco-limo-arcillosa (Vera et al., 2019).	Migajón limosa a migajón arcillosa (Zavala et al., 2011).  Arcillo limoso en un Fluvisol éutrico (López et al., 2007).  Franca y franca arenosa (Vera et al., 2019).	Arcilla (Sandoval et al., 2021), Migajón arcillo arenoso, migajón arcilloso (Zavala et al., 2011).  Arcilla (Medina et al., 2006).

**b) Densidad aparente**

La densidad aparente es una propiedad física del suelo que a su vez depende de la textura del suelo y de la presencia de la materia orgánica. Brinda una noción sobre la retención y el movimiento del agua, transporte de solutos y de la condición porosa de un suelo (USDA, 2008). Además, la densidad aparente es uno de los parámetros más utilizados para conocer las propiedades físicas de un suelo (Salazar et al., 2020) y un indicador de compactación. Su cálculo se basa en la división del peso seco del suelo sobre su volumen; en ese volumen se engloba el volumen del suelo y el volumen de los poros del suelo (USDA, 2008).

Por otro lado, Hossne (2008) afirma que la densidad aparente puede alterarse cuando se presenta un aumento o disminución del volumen de poros en el suelo. Además, una alta densidad de los suelos representa un medio en el cual las raíces de las plantas no pueden tener un desarrollo ideal, la alta densidad aparente de los suelos puede deberse al uso de maquinaria pesada (Salgado et al., 2017).

De acuerdo a lo anterior la densidad aparente se define de la siguiente manera:

$$D_a = \frac{P_s}{V_c} \dots\dots\dots \text{Ecuación 1}$$

Dónde:

$D_a$  = Densidad aparente ( $\text{g cm}^{-3}$ ).

$P_s$  = Masa de la muestra de suelo (g).

$V_c$  = Volumen del cilindro ( $\text{cm}^3$ ).

En los cuatro grupos de suelos predominantes en el estado de Tabasco se han reportado distintos valores de densidad aparente que van desde 0.63 a  $1.56 \text{ g cm}^{-3}$ , tal como se muestra en la Tabla 3.

**Tabla 3**

*Densidad aparente de los grupos de suelos predominantes en Tabasco*

<b>Grupos de suelos predominantes en Tabasco</b>			
<b>Vertisoles</b>	<b>Gleysoles</b>	<b>Fluvisoles</b>	<b>Luvisoles</b>
1.28 a $1.64 \text{ g cm}^{-3}$ en los primeros 120 cm de profundidad (Palma et al., 2007).	De 1.29 y $1.37 \text{ g cm}^{-3}$ en las profundidades de 0-38 cm y 38-70 cm respectivamente (Palma et al., 2007).	Densidades aparentes de entre $1.26$ a $1.56 \text{ g cm}^{-3}$ en los primeros 71 cm de profundidad (Palma et al., 2007).	Densidades aparentes de $1.26$ y $1.29 \text{ g cm}^{-3}$ en las profundidades 0-47 cm y 47-51 cm respectivamente (Palma et al., 2007).
$1.0173 \text{ g cm}^{-3}$ en un suelo vertisol éutrico (López et al., 2007).	$0.94 \text{ g cm}^{-3}$ (Vera et al., 2019).	$1.0561 \text{ g cm}^{-3}$ en un fluvisol éutrico (López et al., 2007).	Densidades aparentes de 0.63, 0.78, 0.79, 0.98, 0.79, 0.98 y $1.03 \text{ g cm}^{-3}$ (Sandoval et al., 2021).
Desde 1.39 hasta $1.42 \text{ g cm}^{-3}$ (Ribón et al., 2003).		Densidades aparentes de entre $1.14$ a $1.29 \text{ g cm}^{-3}$ (Vera et al., 2019).	$0.96$ y $1.02 \text{ g cm}^{-3}$ (Medina et al., 2006).

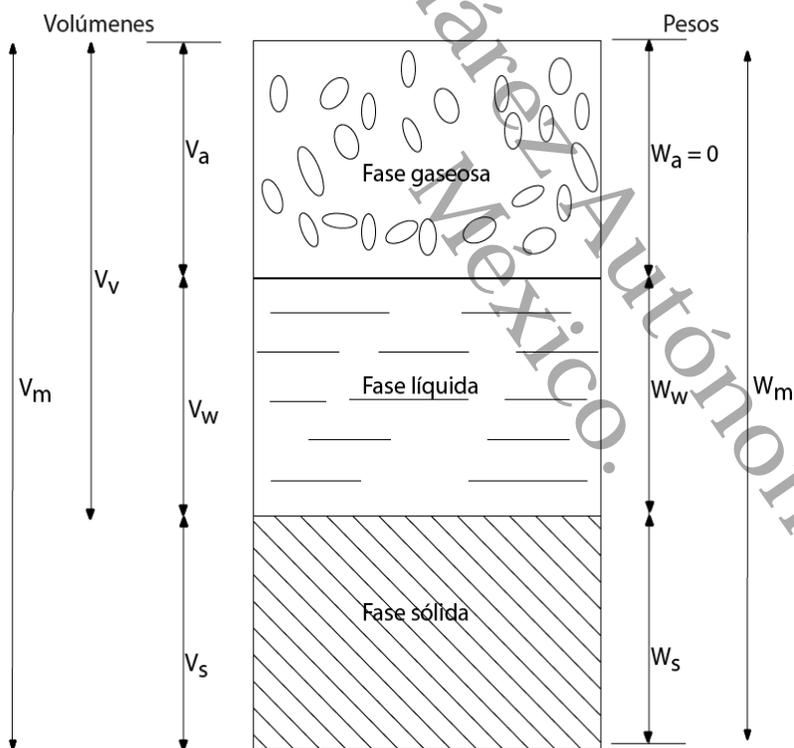
## 2.2. Lámina de agua almacenada en un suelo

### 2.2.1. Componentes del sistema suelo

El suelo es un sistema que está compuesto por tres fases, la fase sólida (el suelo como tal), líquida (agua) y gaseosa (aire) (Macías et al., 2018) como se muestra en la Figura 1. Mientras que Pellegrini (2020) afirma que la fase sólida del suelo se considera heterogénea por el hecho de que en ella se pueden encontrar arena, limo, arcilla y materia orgánica; el resto del volumen del sistema está ocupado por la fase líquida (agua) y el aire (poros, donde se desarrollan las raíces y se encuentra la fauna edáfica).

**Figura 1**

*Representación esquemática del contenido de sólidos, líquidos y gases.*



- $V_m$  = Volumen total de la muestra de suelo (volumen de masa)
- $V_s$  = Volumen de la fase sólida de la muestra (volumen de sólidos)
- $V_v$  = Volumen de los vacíos de la muestra de suelo (volumen de vacíos)
- $V_w$  = Volumen de la fase líquida contenida en la muestra (volumen de agua)
- $V_a$  = Volumen de la fase gaseosa de la muestra (volumen de aire)
- $W_m$  = Peso total de la muestra de suelo (peso de la masa)
- $W_s$  = Peso de la fase sólida de la muestra de suelo (peso de los sólidos)
- $W_w$  = Peso de la fase líquida de la muestra (peso del agua)
- $W_a$  = Peso de la fase gaseosa de la muestra

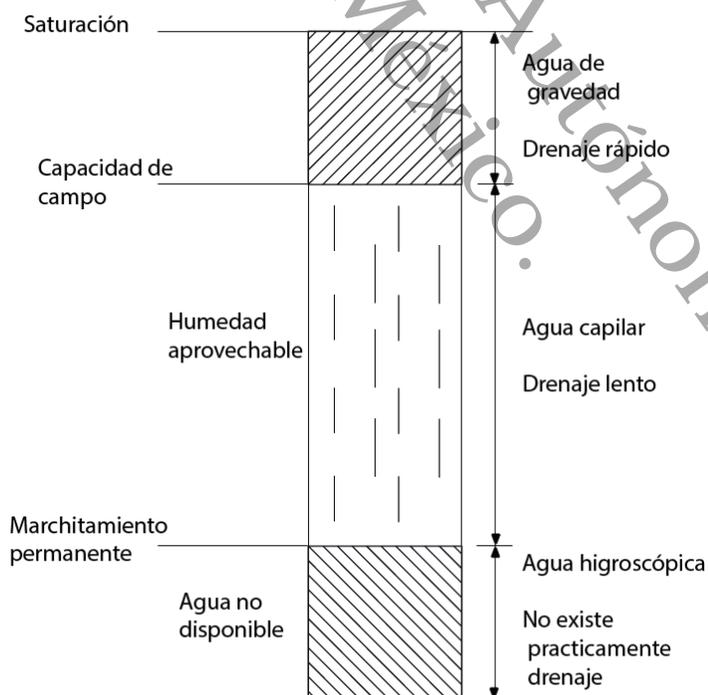
Nota. Adaptado de Representación esquemática del contenido de sólidos, líquidos y gas en el suelo (p. 78), por M. Aguilera C. y R. Martínez E., 1996, Universidad Autónoma Chapingo.

### 2.2.2. Expresiones de humedad del suelo

La humedad del suelo es la cantidad de agua que posee un suelo, estos pueden almacenar diferentes volúmenes de agua dependiendo de sus características físicas (Zotarelli et al., 2019). Cuando un suelo alcanza la capacidad de campo (CC), se sabe que está al 100 % del su contenido de humedad disponible, en cambio cuando el suelo llega al punto de marchitez permanente (PMP) el contenido de humedad disponible para las plantas se ha agotado, aun así, esto no significa que el suelo haya agotado toda el agua que contenía, puesto que aún conserva humedad, sin embargo, las plantas no tienen acceso a ella (Martín, 2017). En la Figura 2 se indica que entre capacidad de campo y punto de marchitez permanente se encuentra la humedad aprovechable, que es el agua que está disponible para las plantas. La CC y el PMP varían en los diferentes tipos de suelo, en la Tabla 4 se muestran valores de CC y PMP que han sido reportados en los principales tipos de suelos de Tabasco.

**Figura 2**

*Clases de agua disponible para los vegetales y características del drenaje.*



Nota. Adaptado de Clases de agua disponibles para los vegetales y características de drenaje (p. 103), por M. Aguilera C. y R. Martínez E., 1996, Universidad Autónoma Chapingo.

**Tabla 4**

*Parámetros de humedad de los grupos de suelos predominantes en Tabasco.*

Parámetro	Grupos de suelos predominantes en Tabasco			
	Vertisoles	Gleysoles	Fluvisoles	Luvisoles
Capacidad de campo (CC)	Porcentajes de CC de 28.9 a 36 % en los primeros 135 cm de profundidad (Palma et al., 2007).	Porcentajes de capacidad de campo de 42.10% en los primeros 38 cm de profundidad, 36.79% de 38 a 78 cm de profundidad y 32.98% de 70-99 cm de profundidad (Palma et al., 2007).	Porcentajes de CC de 30.69% a 33.10% (Palma et al., 2007).	Porcentajes de CC de 7.24% y 7.31% en las profundidades de 0-47 cm y 47-51 cm respectivamente (Palma et al., 2007). Desde 33.59% a 51.86% (Sandoval et al., 2021).
Punto de marchitez permanente (PMP)	Porcentajes de PMP de 17.96 - 19.27 en los primeros 135 cm de profundidad (Palma et al., 2007).	Porcentajes de P.M.P. de 13.91%, 16.02% y 8.57% en las profundidades de 0-38 cm, 38-70 cm y 70-99 cm respectivamente (Palma et al., 2007).	19.56% en los primeros 71 cm de profundidad (Palma et al., 2007).	Porcentajes de PMP que van desde 16.77% a 39.72%, en los primeros 10cm de profundidad, y de 18.70% a 29.15% en una profundidad de 10 a 30cm (Sandoval et al., 2021).

### A) Humedad a saturación

También conocido como Punto a saturación ( $P_{sat}$ ), es el contenido de agua que posee un suelo cuando todos o casi los espacios porosos están ocupados por agua. En los suelos con un drenaje eficiente este estado es temporal puesto que el agua drena por efecto de la gravedad y los poros desocupados pasan a ser ocupados por aire (FAO, 2005).

### B) Capacidad de campo

La capacidad de retención de humedad es una característica de los suelos que representa la relación agua - suelo, el conocimiento de esta característica es elemental para comprender los procesos hidráulicos que se dan lugar en el suelo (Bejar et al., 2020). De acuerdo con Tarjuelo (1991) la capacidad de campo es un parámetro que indica cuánta agua un suelo puede retener en contra de las fuerzas de la gravedad, y está determinada por factores ligados al tipo de suelo como: textura, estructura, el tipo de arcilla presente, la profundidad del frente húmedo, la humedad inicial, la presencia de capas de distinta textura. Mientras que la FAO (2013) menciona que la capacidad de campo (CC) es la cantidad de agua que el suelo es capaz de retener después de ser saturado y de ser drenado libremente al evitar la evapotranspiración y hasta que el potencial hídrico se estabilice (después de 24 a 48 horas de la lluvia o riego). Otros autores indican que la CC se puede obtener a una succión de 0.33 atm, para ello se utiliza la olla de presión u olla de Richards (Mauricio, 2022).

El porcentaje de capacidad de campo puede ser calculado de acuerdo a Silva et al. (1988) de la siguiente manera:

$$CC = 8,658 + (2,751 \times \% \text{ materia orgánica}) + (0,296 \times \% \text{ Limo}) \dots\dots\dots \text{Ecuación 2}$$

para suelos de textura gruesa.

$$CC = 21,977 - (0,186 \times \% \text{ Arena}) + (2,601 \times \% \text{ materia orgánica}) \dots\dots\dots \text{Ecuación 3}$$

$$+ (0,127 \times \% \text{ arcilla})$$

para suelos de textura fina.

$$CC = 9,879 + (3,558 \times \% \text{ Materia orgánica}) + (0,336 \times \% \text{ arcilla}) \dots\dots\dots \text{Ecuación 4}$$

para suelos de textura muy fina.

$$CC = 8,658 + 2.571 * (\% \text{ materia orgánica}) + 0,296 * (\% \text{ limo}) \dots\dots\dots \text{Ecuación 5}$$

para el caso de los suelos arenosos

Sin embargo, el método más desarrollado para la determinación de la CC es el método de la olla de presión el cual se basa en aplicar aire a presión de 1/3 de atmósfera a muestras de suelo previamente saturadas. Para esto las muestras de suelo tamizadas (al menos 25 g) se depositan por triplicado en anillos de retención los cuales son ubicados sobre el plato de cerámica, posteriormente se empareja el suelo contenido por los anillos; durante 18 horas se debe agregar agua al plato poroso, el excedente de esta agua se retira utilizando una pipeta, en seguida, se aplica una presión 1/3 de atmósfera por 18 a 24 horas hasta que el agua deje de escurrir. Posteriormente, se quita la presión aplicada y se tapa la salida de agua de cada plato. Por último, se procede a calcular el valor de la capacidad de campo en porciento en relación con el peso del suelo seco (Aguilera y Martínez, 1996).

### C) Punto de marchitez permanente

El Punto de Marchitez Permanente (PMP) se presenta cuando las plantas pierden la capacidad de succión y siguen perdiendo agua mediante la transpiración, en ese punto las plantas pierden la turgencia de la planta resultando en su marchitez, y se alcanza a una succión hasta 15 bares como máximo (FAO, 2013). Existen diferentes métodos para determinar el PMP, entre los que se encuentran:

- En base a la textura y materia orgánica (Israelsen y Hansen, 1979):

$$PMP = -2,177 + 0,393(\% \text{ arcilla}) + 1,206 (\% \text{ materia orgánica}) \dots\dots\dots \text{Ecuación 6}$$

$$PMP = -5 + 0,74 (\text{capacidad de campo}) \dots\dots\dots \text{Ecuación 7}$$

- Dividiendo el contenido de agua a CC por el factor 1,7 para suelos arcillosos y 2 para suelos arenosos (Silva, 2020).
- Método de la membrana de presión: también conocido como el método de Richards, permite obtener una estimación de la humedad que retiene el suelo a una tensión de 15 atmósferas. En primer lugar, se toman muestras de suelo previamente tamizadas a malla 2 mm (2 repeticiones), la muestra debe ser mezclada. La membrana se humedece, se instala el aparato y se realiza un recorte alrededor del disco de bronce, anillos de hule son puestos sobre la membrana y se depositan las muestras de suelo en ellos, y se

procede a emparejar la muestra. Seguidamente se tapa todo el aparato con papel encerado y se deja reposando con un exceso de agua en la membrana, por lo menos por 16 horas. Pasado este tiempo se retira el exceso de agua con la ayuda de una pipeta y se aplica una presión de 15 atmósferas. Por último, se sacan las muestras después de 24-48 horas de haber realizado la extracción o cuando las lecturas de una bureta para escurrimiento indican que se ha alcanzado el equilibrio. A continuación, las muestras deben ser transferidas a botes para conocer la humedad. Por último, esta muestra se colca a la estufa a una temperatura constante a 105 °C para determinar el peso seco de la muestra, el porcentaje de humedad se expresa con respecto a el peso del suelo seco (Aguilera y Martínez, 1996).

#### **D) Humedad higroscópica**

De acuerdo con Caicedo et al. (2021) la humedad higroscópica es una película muy delgada alrededor de la superficie de las partículas del suelo, presenta fuerzas de adhesión, por lo que se considera agua no disponible. En relación con la textura de los suelos, los suelos arcillosos retienen más agua higroscópica que los suelos arenosos.

La humedad higroscópica del suelo es la capacidad del suelo para absorber y retener la humedad del aire circundante. Es el contenido de agua que se obtiene de la diferencia de peso entre un suelo seco al aire, y un suelo secado en estufa a 105 - 110 °C, referido al peso seco y expresado en porcentaje (Fairbridge y Finkl, 1979).

La humedad higroscópica variará dependiendo de la humedad atmosférica. Si un material granular se encuentra en equilibrio con una atmósfera totalmente seca, la humedad higroscópica desaparecerá, en cambio aumentará a medida que se incrementa la humedad relativa (Robinson, 1960).

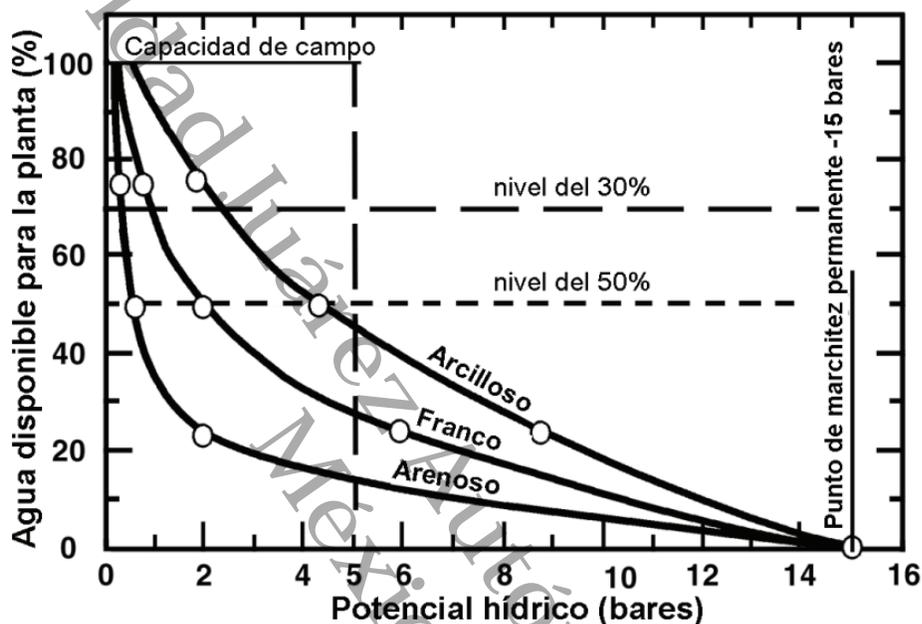
#### **E) Humedad aprovechable**

La humedad aprovechable es la diferencia entre el Punto de Capacidad de Campo y el Punto de Marchitez Permanente, que es el agua disponible para cultivo en mm o expresado porcentualmente (Bejar et al., 2020). Un factor importante que determina este parámetro es la textura del suelo que influye en la cantidad de agua en un suelo drenado hasta el punto de capacidad de campo y la cantidad que está disponible para las plantas (Silva, 2020). Por otro lado, el porcentaje de agua disponible para la planta está en función del potencial hídrico como se muestra en la Figura 3, en la que se observa que para cada textura de suelo el porcentaje de agua disponible varia aun estando bajo el mismo potencial hídrico, esto significa que un suelo

arcilloso tiene más agua disponible para la planta que un suelo arenoso aun cuando ambas están sometidas al mismo potencial hídrico (Martin, 2017).

**Figura 3**

*Eficiencias estimadas para períodos temporales promedio y períodos de uso máximo de agua.*



Nota. Tomado de *Tabla de eficiencias estimadas para períodos temporales promedio y períodos de uso máximo de agua*, de Edward C. Martin, 2017, <https://repository.arizona.edu/handle/10150/625275>. CC BY 4.0

Con los parámetros de CC y PMP teóricamente se puede obtener la humedad aprovechable considerada como la lámina de agua disponible para las plantas, esta humedad no se debe consumir al 100 %, por lo que se incluye otro termino llamado nivel de agotamiento permisible, el cual se maneja entre 30 y 65 % de la humedad aprovechable, este porcentaje varía dependiendo del cultivo. Según FAO (2006) la importancia de la determinación del nivel de agotamiento permisible se deriva del hecho de que la capacidad de la planta de extraer agua del suelo disminuye antes de llegar al punto de marchitez permanente; debido a que el suelo presenta mayor fuerza matricial y a la planta le dificulta extraer el agua del suelo con la suficiente velocidad para cumplir con lo que la parte aérea demanda debido a la transpiración.

## **F) Humedad de gravedad**

Es toda el agua que se mueve por los macro poros del suelo y es arrastrada por la fuerza de gravedad, esto ocurre cuando el agua procedente de precipitaciones o riego ha ocupado todos los poros y esta se va moviendo hacia abajo por el perfil del suelo (Valenzuela et al., 2001).

### **2.2.3. Lámina de riego**

Lámina de riego es la cantidad de agua que se debe aplicar en el suelo con el fin de satisfacer las necesidades del cultivo, la cual dependerá de la capacidad de almacenamiento de agua del suelo, la profundidad radicular del cultivo y la densidad aparente del suelo; esta es expresada en milímetros o centímetros (Marín, 2021); además la lámina de agua depende de la capacidad de campo y punto de marchitez permanente.

## **2.3. Variabilidad espacial**

### **2.3.1. Concepto**

A las diferencias que se presentan en la medición de una variable en diferentes ubicaciones espaciales se le conoce como variabilidad espacial. Materiales de origen natural como la roca, el suelo, el agua y el aire, poseen propiedades físicas o químicas que se asocian con la variabilidad espacial. La variabilidad espacial se debe a ocurrencia de procesos geológicos, ambientales y físico químicos que ocurren aleatoriamente en el tiempo y espacio, estos procesos están y pueden seguir modificando a las propiedades de los materiales (Li y Li, 2022).

### **2.3.2. Importancia**

La variabilidad espacial tiene importancia en distintas ramas de la ciencia, en la agricultura es utilizada para el monitoreo de rendimientos de los cultivos (García et al., 2021), en la determinación de las características químicas (Varela, 2022) y físicas de los suelos (Vargas et al., 2021), en la detección de plagas y enfermedades de los cultivos (Alemán et al., 2022). Por otra parte, ha sido usada en otras ramas como la economía (Santana, 2020), la salud pública (Rabanaque, 2021).

### **2.3.3. La variabilidad espacial en los suelos**

La idea de definir la variabilidad espacial presente en los suelos se relaciona con el objetivo de delinear zonas y prácticas agronómicas adecuadas de acuerdo a las características propias de cada suelo, en busca de elevar la productividad de los cultivos y preservar los recursos naturales (Duarte y Montaña, 2020).

El tipo de variabilidad más común en los suelos es la variabilidad espacial, su estudio puede conducir al manejo más adecuado del recurso suelo y por consecuencia a aumentar la eficiencia y rentabilidad de la producción agropecuaria (Jaramillo, 2012). Asimismo, Roel y Terra (2006) mencionan que en los suelos frecuentemente se observa variabilidad espacial puesto que existe una compleja combinación de suelos, características de estos y diferentes prácticas de manejo, que da lugar a la variabilidad espacial en las propiedades tanto físicas como químicas de los suelos.

Existen diferentes metodologías para cuantificar o estimar a variabilidad espacial de suelos y cultivos: a) discretos (muestreo de suelos y plantas en grillas) b) continuos (monitores de rendimiento, sensores de conductividad eléctrica del suelo) y c) remotos (imágenes satelitales) (Roel y Terra, 2006).

La variabilidad espacial en las características físicas del suelo es la causa de la desuniformidad del agua de riego aplicada a los cultivos. Aumentar la eficiencia de la aplicación del agua de riego es posible con el conocimiento de las áreas que poseen las mismas propiedades físicas, mediante el uso de modelos computacionales (Best, 2006).

### **2.4. Los Sistemas de información geográfica**

A lo largo de los años se han dado múltiples definiciones de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) al grado tal que, desde el siglo pasado numerosos autores los han conceptualizado, Santos (2020) define a los SIG como un conjunto de software de ordenador, hardware y periféricos, que con base en datos geográficamente referenciados son útiles para transformar esta información en una que sea práctica y eficiente para localizar, definir interacciones espaciales y relaciones geográficas de una entidad fija o dinámica que ocupe un espacio en algún entorno, ya sea natural o construido. En consonancia con ello, Pauta et al. (2019) mencionan que los SIG son una herramienta que facilita la obtención, gestión,

manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos geográficamente referenciados, con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión.

#### **2.4.1. Importancia de los SIG**

La utilidad de los SIG no se enfoca en una sola área, puesto que su capacidad de responder cuestiones relacionadas con problemas de carácter espacial (Santos, 2020) los hace una herramienta esencial para cualquier tipo de usuario.

A mediados de la década de 1960 surgen las primeras aplicaciones de sistemas de información geográfica (Humacata, 2020), desde entonces los SIG han ganado terreno y se usan cada vez más en distintas áreas. Algunos de los usos de los SIG es en la toma de decisiones en el desarrollo de energías renovables (Guerrero et al., 2019); en el turismo (Doumet et al., 2021); en estudios de riego, físico- naturales, geofísicos, etcétera (Principi, 2019; Uribe et al., 2019); en la elaboración de cartografía temática de clasificación y cambio de usos de suelo (Humacata, 2020); en el estudio de cuencas hidrográficas (Buzai y Montes, 2021); en el ordenamiento territorial (Baxendale y Buzai 2011); en el análisis de la distribución espacial de precipitaciones (Buzai y Montes, 2021); en el análisis de problemas de salud pública (Buzai y Montes, 2021) (Prieto et al., 2021); en el análisis de la seguridad pública y criminalidad (Jiménez et al., 2021). Los usos que se le han dado a los SIG, es sumamente extensa la cantidad de bibliografía existente en las que se puede identificar el empleo de los SIG, lo cual demuestra la importancia que estos sistemas han cobrado para la investigación, la toma de decisiones, etc. Además, se cree aproximadamente más del 70 % de la información manejada en cualquier disciplina está geográficamente referenciada (Olaya, 2020). Por otro lado, Santos (2020) afirma existen seis grandes tipos de cuestiones que se pueden responder con el uso de los SIG, éstas son: localización directa, localización condicionada, tendencias, rutas, pautas y modelos.

#### **2.4.2. Aplicación de los SIG en la agricultura**

Los sistemas de información geográfica también tienen importancia en el área agrícola, se han constituido como una herramienta valiosa para monitoreo y desarrollo de medidas de control de plagas agrícolas (Espinosa y Machado, 2022), identificación de áreas aptas para agricultura (Andrade et al., 2019), elaboración de planos para fincas agrícolas con fin de evaluar con mayor precisión densidades de siembra, estimar dosis de fertilización, monitoreo de

información físico-química del suelo (Canto et al., 2022), en la topografía agrícola para conocer la altimetría y curvas de nivel, que son útiles para la realización de surcos, siembra con pilotos automáticos, mapas de rendimiento (Arcia, 2020), entre otros. Por otro lado, lo que se conoce como agricultura de precisión es la definición más popular de lo que es la aplicación de los SIG en la agricultura, y de acuerdo con Rambauth (2022) su uso permite mejorar la eficiencia, reducir costos y tener una mejor perspectiva para la toma de decisiones.

### **2.4.3. Los SIG en el riego agrícola**

En cuestión al riego agrícola, la desuniformidad de los suelos tratados de forma uniforme da como resultado áreas con menor rendimiento, por lo que el manejo homogéneo de los suelos sin tener en cuenta la variabilidad de éstos debe ser un factor a corregir puesto que da como resultado mermas en la producción y calidad del producto, así como el riesgo de pérdida de algunos de los recursos naturales de las fincas (Best, 2011).

Los SIG son herramientas que ayudan a elevar la eficiencia al momento de gestionar y manejar los sistemas de riego, de esta manera tareas como la gestión de concesiones del uso del agua, determinación del catastro de riego, la estimación de requerimientos hídricos por patrón de cultivo, la superficie de cada cultivo, etc., pueden ser realizadas con mayor precisión y rapidez, esto gracias a las variadas herramientas y complementos que los SIG ofrecen para el análisis y la evaluación (Chávez et al., 2020). Al respecto, Mena et al., (2007) desarrollaron un sistema de información geográfica para la mejora de la gestión del agua del riego. Por otra parte, los SIG son igualmente útiles en la gestión del agua de riego (Roldán et al., 2010). Asimismo, pueden ser usados para realizar la evaluación de sistemas de riego por superficie (Ramos et al., 2019) o en la evaluación de sistemas de riego por aspersión tal a como lo realizó Dávila (2022) quien utilizó los SIG en el señalamiento de límites perimetrales y creación de mapas topográficos, de textura de suelo, de los sectores y diseño del riego, para proceder a la evaluación del mismo. Mientras que Bravo y Moreno (2007) utilizaron los sistemas de información geográfica para realizar la programación del riego, considerando variables como CC, PMP, textura, etc. Por otra parte, estos autores mencionan el uso de los SIG en la programación del riego permitió ahorrar más de 50% del caudal utilizado.

### III. Justificación

En la actualidad es necesario contar con mapas que se enfoquen en las láminas de agua que los suelos pueden almacenar, que son de gran importancia para planificar la eficiencia de uso de agua en su aplicación mediante el riego y a su vez para el diseño del drenaje agrícola (Lince, 2021). Por ello, es importante construir mapas que contribuyan a la planificación del suministro de agua al cultivo de plátano de la Finca La Victoria del municipio de Teapa Tabasco; así, como al ahorro de energía y al mismo tiempo que sirva de marco de referencia para dar una mejor adecuación a las políticas de desarrollo agrícola por parte de los Gobiernos Estatal y Federal.

Por otro lado, la elaboración de mapas en la zona de estudio impactará en la toma de decisiones para las prácticas agronómicas. Con estos mapas se podrán definir las zonas que requieren mayor cantidad de agua que finalmente impacta en las láminas de riego, lo que se le puede llamar agricultura de precisión en el manejo del agua. Estas acciones pueden contribuir en incrementar la producción agrícola de la Finca “La Victoria”, aprovechando las condiciones agroclimáticas, para ser autosuficientes y competitivos en los mercados potenciales.

Además, es bien sabido que el riego es uno de los factores limitantes más importantes en la producción agrícola (Melo y Contreras, 2022); por lo que, la determinación de las láminas de almacenamiento en un estrato para riego a cada área podrá ayudar a elevar los rendimientos y por consecuente, elevar la rentabilidad del cultivo.

Por lo mencionado anteriormente, el presente trabajo contribuirá al uso eficiente del agua, e impactará en la disminución de costos de producción (ahorro de energía eléctrica y de uso de agua) para la producción de banano en la Finca “La Victoria”.

#### IV. Pregunta de investigación

La agricultura usa 70 % del agua y se considera que la población mundial para el año 2050 superará los 10 000 millones de habitantes (Banco Mundial, 2022). Esto hace pensar en que el crecimiento demográfico demandará alimentos, lo cual obligará a intensificar áreas de cultivo ya existentes (aumento del rendimiento por área, crear nuevas áreas de cultivo, entre otros), por lo que de seguir en esta línea la agricultura tendrá que disponer cada vez de más agua, sin embargo, esto no será posible debido a la disminución de este recurso en el planeta. Por ello, nace la necesidad de darle un uso eficiente al agua, y para resolver este problema es necesario hacer uso de una agricultura de precisión, en la cual cada área de cultivo reciba la cantidad de agua necesaria y sin excedentes, en otras palabras, que cada unidad de suelo reciba solamente la cantidad de agua que puede almacenar. Lo anterior se puede lograr con la caracterización de los suelos y el conocimiento de su capacidad de retención de humedad, en este contexto la cartografía especializada se posiciona como una herramienta útil para adaptarse a los cambios venideros

Por otro lado, los suelos son uno de los recursos naturales no renovables (Montico, 2021) que a través del tiempo varían sus propiedades físicas, que son una de las principales causas de la pérdida de este recurso es su mal uso y manejo, a menudo por las malas prácticas agrícolas que contribuyen a la pérdida de el suelo (Villareal, 2021). Además, se sabe que el suelo guarda una estrecha relación con el agua, puesto que la cantidad de agua que un suelo puede almacenar depende de las características físicas de éste (Vargas et al., 2021). Por ello, la capacidad de almacenamiento de agua del suelo es un factor clave a determinar cuando se habla, en el ámbito agrícola, del riego. El cual afecta el diseño de los sistemas de riego y del drenaje agrícola que requieren los parámetros de humedad (CC, PMP y Punto a Saturación) para mejorar la eficiencia del riego y desalojo del agua de las zonas agrícolas.

Considerando ambos recursos (agua y suelo) y teniendo en cuenta la variabilidad espacial de la lámina de agua que un suelo puede almacenar, se puede alcanzar el objetivo del uso correcto del recurso agua y suelo.

Si bien es cierto existe cartografía generada en el estado de Tabasco referente a suelos, su uso y clasificación, ésta no aterriza en los estudios de riego y drenaje. Por ejemplo, a partir de los años 60s, la Comisión del Río Grijalva, fue la primera institución que inició los estudios de suelos en Tabasco; desde entonces a la fecha, se sabe de la existencia de más de 60 estudios del suelo, que van desde estudios de reconocimiento hasta estudios agrológicos detallados y

especiales (Palma, 2017). Cabe señalar, que la mayor parte de esta información se encuentra dispersa y en muchas ocasiones olvidadas en las diferentes bibliotecas y archivos de organismos oficiales y privados. Por otro lado, la cartografía de Tabasco está basada con mapas elaborados por el INEGI, en los cuales existen cartas de uso de suelo, edafológicos, geológicos, hidrológicos, entre otros, desafortunadamente algunos no han sido actualizados y son plasmados con objetivos particulares; además, estos mapas no están enfocados a determinar las láminas de riego para los cultivos, por lo que es necesario elaborar un mapa de suelos que se apegue a las láminas de riego y a la lámina de agua almacenada en un perfil de suelo. Aunado a lo anterior, no existen estudios que involucre la relación agua - suelo en la región de la Sierra de Tabasco, lo cual contribuye al uso eficiente de los recursos naturales (agua, suelos) de las áreas agrícolas. Aunado a lo anterior, no se cuenta con cartografía generada con estos fines que tienen impacto en el manejo de los recursos hídricos, el riego y los recursos naturales (suelos).

Con respecto a la Finca la Victoria, localizada en el municipio de Teapa Tabasco, se cuenta sólo con la caracterización física de los suelos de forma puntual; por lo que se requiere realizar su cartografía en todo el polígono. Para ello, es necesario realizar un mallado y con esto definir la cantidad de agua que almacena el suelo por zona, con base a sus propiedades físicas.

## V. Hipótesis

La aplicación de los sistemas de información geográfica ayudan a determinar las áreas potenciales de mayor almacenamiento de agua en el estrato 0-90 de un suelo Gleysol en la finca “La Victoria”, Teapa Tabasco.

## VI. Objetivos

### 6.1. Objetivo general

Aplicar los sistemas de información geográfica para mostrar la distribución espacial de la lámina de agua almacenada en un suelo Gleysol en la finca “La Victoria”, Teapa Tabasco.

### 6.2. Objetivos específicos

Determinar las características físicas del suelo que definen la lámina de agua almacenada en un suelo Gleysol en la finca “La Victoria”, Teapa Tabasco.

Construir mapas que definen la lámina de agua almacenada en el estrato 0-90 con el uso de los sistemas de información geográfica.

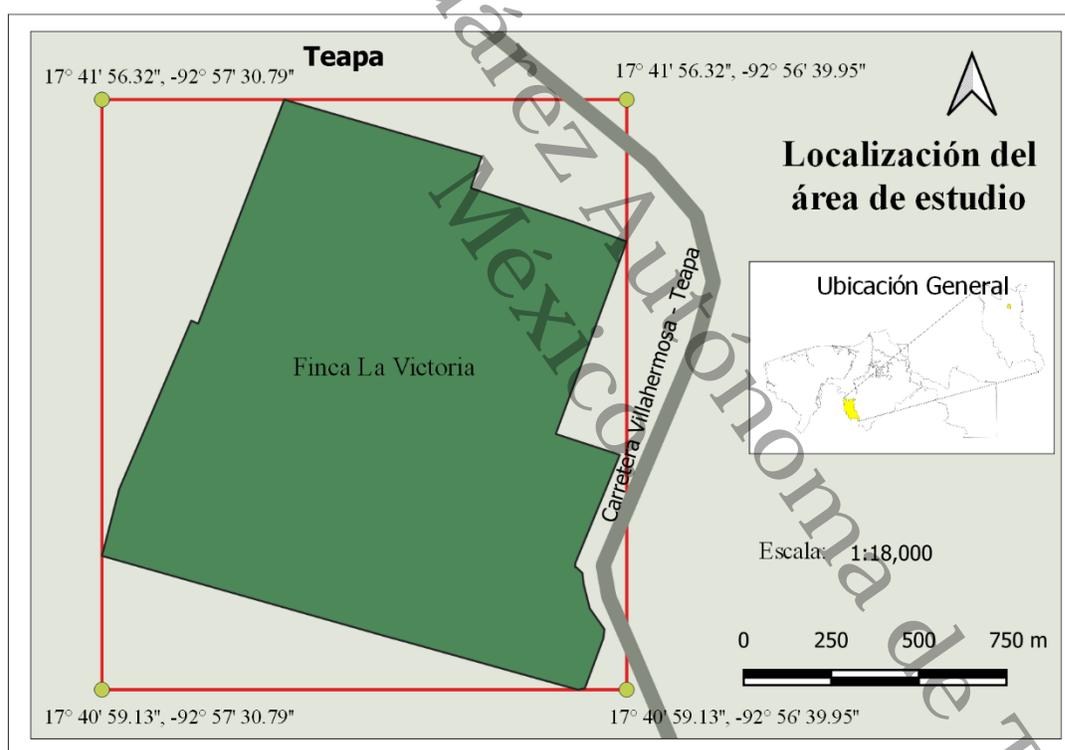
## VII. Metodología

### 7.1. Localización del área de estudio

La investigación se realizó en la platanera “La Victoria” del municipio de Teapa Estado de Tabasco; cuyas coordenadas geográficas del lado izquierdo inferior:  $17^{\circ}40'59.13''$  N,  $92^{\circ}57'30.79''$  W y del lado derecho superior:  $17^{\circ}41'56.32''$  N,  $92^{\circ}56'39.95''$  W (Figura 4).

**Figura 4**

*Localización del área de estudio*



El área de estudio es de una superficie de 168 ha, son suelos con alto contenido de materia orgánica y nutrientes, de colores oscuros, de texturas variadas en el perfil, que presentan manto freático cercano a la superficie gran parte del año y que en ocasiones presentan problemas de anegamiento, corresponden a la unidad Gleysol mólico (Palma et al., 2007).

El clima se caracteriza por ser cálido húmedo con lluvias todo el año (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2017). De acuerdo a la estación 00027044 Teapa DGE, se registra una precipitación media anual de 3085.3 mm, temperatura máxima promedio de  $32.1^{\circ}\text{C}$ ,

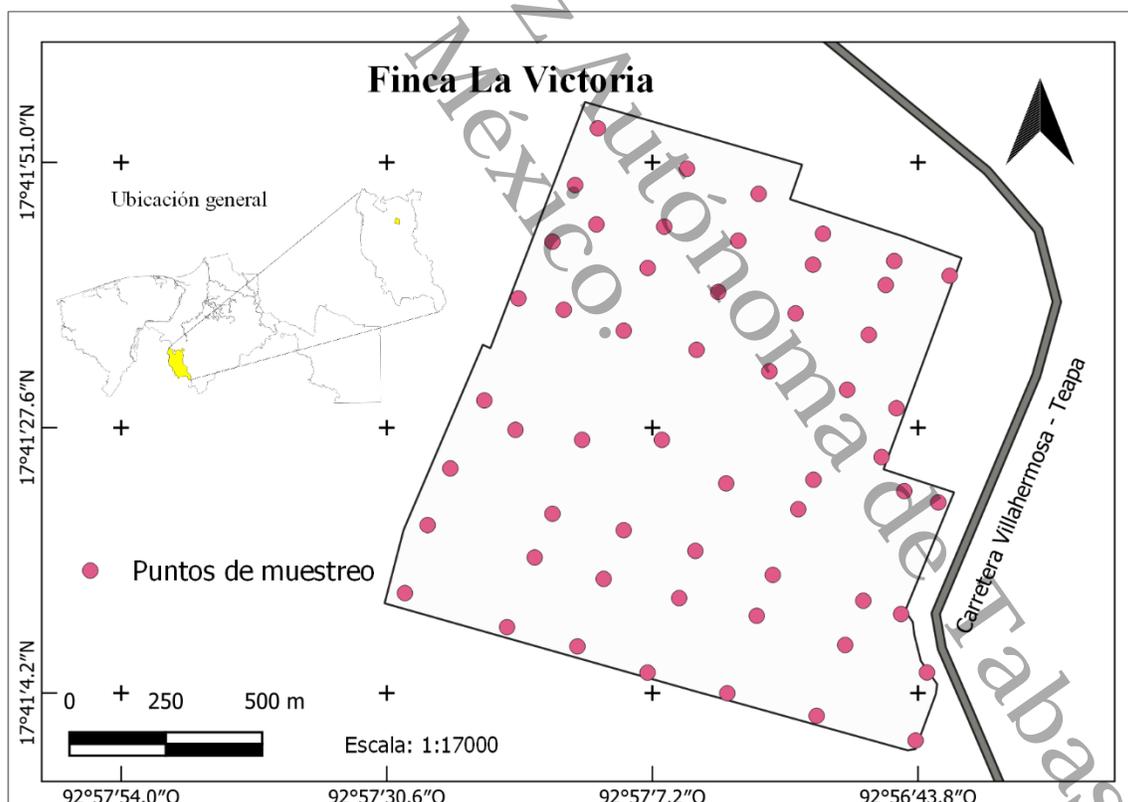
mínima de 21.1°C y una temperatura media mensual de 26.6°C Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2023), datos considerando el periodo de 1991 al 2020.

## 7.2. Muestras de suelos

El muestro se llevó a cabo mediante un sistema de grillas; esto minimiza las dificultades asociadas a la interpolación (Roel y Terra, 2006). La superficie esta divide en dos bloques A y B, la grilla en el bloque A es de 180 m \* 200 m, y en el bloque B es de 160 m \* 200 m, en esa intersección se realizaron los muestreos, así como en la periferia del área de estudio, cubriendo un punto por 10 ha como mínimo (Figura 5). El muestreo de suelos se realizó durante el periodo abril – mayo del año 2023, para posteriormente realizar los análisis físicos.

**Figura 5**

*Ubicación de los puntos de muestreo*



Los muestreos del suelo se realizaron en tres profundidades 0-30, 30-60 y 60-90 cm con una barrena tipo Edelman. Las muestras fueron llevadas al laboratorio de Suelos y Plantas de

la División Académica de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, para su secado a temperatura ambiente y posteriormente tamizarlas y determinar las propiedades físicas. En los puntos de muestro se determinaron las coordenadas geográficas con un GPS marca Garmin (GPSMAP 64x) con una precisión de 3.65 m.

### **7.3. Determinación de variables**

Se determinó en las muestras de suelo la textura, densidad aparente ( $D_a$ , método del cilindro), capacidad de campo (CC, método de olla de presión), punto de marchitez permanente (PMP, membrana de presión) (DOF, 2002), lamina neta, lamina bruta y punto de saturación (Aguilera y Martínez, 1996) para las profundidades de 0-30, 30-60 y 60-90.

#### **7.3.1 La textura**

La textura del suelo se determinó por el método Bouyoucos. Se pesaron 50 g de suelo tamizado en malla de 2 mm y posteriormente se les agregó agua y 35 ml de hexametáfosfato de sodio. A continuación, se mezcló durante cinco minutos en el mezclador de dispersión, y se colocó en una probeta, donde posteriormente se aforó a 1030 ml con agua introduciendo previamente un hidrómetro. Se agitó durante 3 minutos, por último, se tomó lecturas con el hidrómetro y termómetro a los 40 segundos y a las 2 horas (DOF, 2002).

#### **7.3.2 Densidad aparente**

Para conocer la densidad aparente del suelo se tomó con una barrena de suelo (método del cilindro) de volumen conocido. Posteriormente. Las muestras de suelo se secaron en la estufa a una temperatura de 105 °C. Finalmente, con la relación peso volumen se obtuvo la densidad aparente.

#### **7.3.3 Capacidad de campo**

La humedad a capacidad de campo se determinó de la siguiente forma: se usó una olla de presión. En un plato de cerámica se colocaron las muestras de suelo contenidas en anillos de hule, posteriormente el suelo se saturó durante 24 horas, una vez transcurrido este tiempo el

plato con las muestras se colocó en la olla de presión, a la que se aplicó una presión de 0.33 atmósferas durante 24 horas. Cada muestra se determinó el peso húmedo, dichas muestras se colocaron a la estufa a una temperatura de 110 °C durante 24 horas a las que se obtuvo el peso seco y con ello se obtuvo el porcentaje de humedad del suelo.

#### 7.3.4 Punto de marchitez permanente

El punto de marchitez permanente se determinó con una membrana de presión, se usó un plato de cerámica en las que se colocaron las muestras de suelo en anillos de hule, para ello el suelo se saturó durante 24 horas, previo a la colocación de la membrana de presión, posteriormente se aplicó presiones de 15 atmósferas durante 24 horas. El porcentaje de humedad del suelo se determinó igual que al de capacidad de campo.

#### 7.3.5 Humedad a saturación

La humedad a saturación o punto de saturación ( $P_{sat}$ ) se obtuvo tomando una muestra de suelo a la cual se colocará en un crisol a la que se le agregará agua lentamente. La muestra se batió con una espátula y se dejó de agregar agua hasta que se observó una película de agua adherida a la superficie del suelo, posteriormente esa muestra se pesó para obtener el peso húmedo y posteriormente se colocó en la estufa a una temperatura de 110°C durante 24 horas, para finalmente obtener el peso seco y con ello el porcentaje a saturación.

#### 7.3.6 Cálculo del porcentaje de humedad para CC, PMP, $P_{sat}$

Para los parámetros de CC, PMP y  $P_{sat}$  se determinaron el peso húmedo después de ser retirados de la olla de presión, membrana y ser batido, respectivamente, ese suelo. Estas muestras después de ser sacadas de la estufa se determinó el peso seco. Con la siguiente fórmula se obtuvo el porcentaje de humedad de forma gravimétrica ( $\theta_w$ ):

$$\theta_w = \frac{(P_{sh} - P_{ss})}{P_{ss}} * 100 \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 8}$$

Donde:

$\theta_w$  = Humedad gravimétrica, %

$P_{sh}$  = Peso de suelo húmedo (g)

$P_{ss}$  Peso de suelo seco (g).

### 7.3.7 Lámina de almacenamiento

La lámina almacenada se determinó para cada estrato con la siguiente fórmula:

$$L_{almx} = \frac{(Px) * Da * Pr}{Dw} \dots\dots\dots \text{Ecuación 9}$$

Donde:

$L_{alm}$  = Lámina de agua almacenada para el punto a saturación, CC, y PMP, en cm

$Px$  = Corresponde a la humedad gravimétrica a punto a saturación, CC, y PMP, %

$Da$  = Densidad aparente del suelo,  $g\ cm^{-3}$

$Dw$  = Densidad del agua,  $g\ cm^{-3}$

$Pr$  = espesor del estrato del suelo, en cm.

Una vez obtenida la lámina almacenada para cada estrato, se obtendrá la lámina total almacenada, sumando las láminas parciales de cada estrato.

### 7.3.8 Lámina de riego

La lámina riego se determinó para cada estrato con la siguiente fórmula:

$$L_r = \left[ \frac{(CC - PMP) * Da * Pr}{Dw} \right] \dots\dots\dots \text{Ecuación 10}$$

Donde:

$L_r$  = Lámina de riego, en cm

$CC$  = Capacidad de campo volumétrica, en decimal

$PMP$  = Punto de Marchitez Permanente volumétrica, en decimal.

$Da$  = Densidad aparente del suelo,  $g\ cm^{-3}$

$Dw$  = Densidad del agua,  $g\ cm^{-3}$

$Pr$  = espesor del estrato del suelo, en cm.

Una vez obtenida la lámina de riego para cada estrato, se obtuvo la lámina total de riego sumando los tres estratos.

### **7.5. Construcción de mapas**

Se construyeron mapas de textura, CC, PMP y Da para los estratos 0-30, 30-60 y 60-90 cm y planos para la Finca la Victoria, así como la lámina de agua almacenada y de riego en cada estrato y la total para la profundidad de 0-90 cm. Estos planos se realizaron con el software QGIS con la técnica de interpolación Kriging. Para la elaboración de mapas todas las variables se clasificarán por rangos, dependiendo estos de la distribución de los valores de celdas resultantes de la interpolación.

### **7.6. Análisis estadístico**

Se realizó la estadística descriptiva con el software GS+ Versión 10 de prueba, para cada una de las variables determinadas, así como la elaboración del semivariograma experimental, para seleccionar el mejor modelo teórico y luego se realizó la estimación de los puntos no medidos utilizando el método Kriging.

## VIII. Resultados y discusión

Para la mayoría de los parámetros evaluados en este estudio no existe puntos georeferenciados en otro estudio que permitan la comparación con los resultados de la zona de estudio "La Victoria", aunque se encuentra información documentada en algunos geoportales como los de CONABIO, INEGI o SEMARNAT que presentan datos como la clase textural o la unidad de suelo, o incluso Palma et al. (2007) quienes presentan cartografía de las clases de uso de suelo según su capacidad de uso agropecuario para toda el área de Tabasco; en ninguna de los anteriores ha considerado otras características físicas de los suelos como lo son densidad aparente, humedad a saturación, capacidad de campo, punto de marchitez permanente o incluso láminas de riego con fines de mostrar su distribución espacial.

### 8.1. Densidad aparente

La densidad aparente en la profundidad 0-30 cm está en los rangos de 1.1-1.14 g cm<sup>-3</sup> y 1.14-1.18 g cm<sup>-3</sup> que comprende más del 90 % del área total (Tabla 5), y no pertenece a las clases que generaron mayor número de polígonos o islas. La densidad aparente en esta profundidad con mayores valores se encuentra hacia el suroeste. Caso similar ocurre en la profundidad 30-60 cm, donde de igual manera las clases 1.1-1.14 g cm<sup>-3</sup> y 1.14-1.18 g cm<sup>-3</sup> representan más de 90 % del área de estudio y en la profundidad 60-90 cm, donde éstas mismas clases suman 68 %, asimismo en ninguna de ambas profundidades estas clases han sido las que han generado más polígonos. Al comparar la densidad aparente en las tres profundidades se encontró que las más altas en general se presentaron en la profundidad 60-90 cm, ubicándose estas principalmente en el centro del área de estudio (Figura 1A, Anexo).

Los suelos del área de estudio fueron clasificados por Palma et al. (2007) como Gleysol mólico, con base en el perfil de suelo presentado por estos autores en los estratos 0-38 y 38-70 cm definen una densidad aparente de 1.29 y 1.37 g cm<sup>-3</sup> respectivamente, datos superiores a los encontrados en este estudio. Además, Duarte y Montaña (2020) quienes estudiaron la variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas de los suelos en Honduras, encontraron variaciones en la densidad aparente, lo que coincide en este estudio. Por otro lado, este parámetro es importante ya que se relaciona con otras propiedades físicas y químicas del suelo, además brinda información de su uso y manejo que tiene un efecto directo en el crecimiento de las plantas (Salamanca et al., 2018)

**Tabla 5**

Resumen de interpolación del parámetro densidad aparente.

Profundidad	Densidad aparente				No. Polígonos
	Rango	Hectáreas	Porcentaje		
0-30 cm	<=1.1	2.7685	1.63%		5
	1.1-1.14	76.4463	45.07%		5
	1.14-1.18	81.0476	47.78%		2
	1.18-1.22	9.3286	5.50%		10
	>1.22	0.0425	0.03%		2
30-60 cm	<=1.1	11.4136	6.73%		11
	1.1-1.14	89.7745	52.92%		5
	1.14-1.18	65.0794	38.36%		4
	1.18-1.22	3.3412	1.97%		8
	>1.22	0.0248	0.01%		1
60-90 cm	<=1.1	22.789	13.43%		8
	1.1-1.14	64.7347	38.16%		3
	1.14-1.18	50.6207	29.84%		1
	1.18-1.22	20.6308	12.16%		7
	>1.22	10.8583	6.40%		3

## 8.2. Textura

En las tres profundidades se presentó la dominancia de la clase textural arcilla, seguido de la clase textura franco arcilloso, y arcillo limoso (en las profundidades 0-30 y 60-90 cm) (Tabla 6). La profundidad en la que más clases texturales se encontraron fue la 60-90. Por otra parte, la clase textural franco arcilloso en la profundidad 0-30 cm fue en la que más polígonos se observaron, sin embargo, se trata de manchones de poca área. La clase textural franco arcillo arenoso, franco arcillo limoso y franco solamente fueron reportadas en la profundidad 60-90 cm y se tratan igualmente de áreas muy pequeñas ubicadas en la parte sur del área de estudio (Figura 2A, Anexo).

En lo referente a la textura del suelo, en un estudio donde se analizó la distribución espacial de propiedades físicas de suelos aluviales, Reza et al. (2016) destacan que los porcentajes de arena, arcilla y limo, son las propiedades físicas que tienen mayor influencia sobre todas las demás características de los suelos.

**Tabla 6**

*Resumen interpolación del parámetro textura.*

Profundidad	Clase textural	Textura		
		Hectáreas	%	No. Polígonos
0-30 cm	Arcilla	145.553	85.74%	1
	Franco arcilloso	23.803	14.02%	9
	Arcillo limoso	0.401	0.24%	1
30-60 cm	Arcilla	159.942	94.22%	1
	Franco arcilloso	9.814	5.78%	5
60-90 cm	Arcilla	118.236	69.65%	4
	Franco arcilloso	45.017	26.52%	3
	Arcillo limoso	3.959	2.33%	5
	Franco	1.516	0.89%	2
	Franco arcillo limoso	0.86	0.51%	2
	Franco arcillo arenoso	0.164	0.10%	1

### 8.2.1. Arena

El contenido de arena, en la profundidad 0-30 cm, se presenta en más de 50 % del área de estudio y tiene un contenido de arena de entre 22 y 27 %. Además, en la profundidad 30-60 cm este rango fue el que predominó con mayor área ocupada (39.78%), y el resto se distribuye en el resto del área entre los rangos de 17-22 % y de 27-32 %, ya que en esta profundidad no se encontraron valores de porcentaje de arena menores a 17%, ni mayores a 32%. Donde tampoco se registraron valores mayores al 32% de arena fue en la profundidad 60-90 cm, en esta misma, más de 80% del total del área de estudio registró valores de porcentaje de arena de entre 17 y 27% (Tabla 7). En cambio, en información de CONABIO (2020) señalan el porcentaje de arena en el área de estudio va en el rango de 40-56.38 %, de 39.64-41.29 %, de 40.32-40.96 %, de

35.79-36.86 % y de 34-44.04 %, en las profundidades 0-5, 5-15, 15-30, 30-60 y 60-90 cm, respectivamente; información que difiere en este estudio. Por otra parte, con base en el perfil de suelo correspondiente al tipo de suelo que de acuerdo a Palma et al. (2007) compete al área de estudio, estos autores reportan porcentajes de 40.7, 39.3 y 38.7 5 de arena en las profundidades 0-38, 38-70 y 70-99 cm respectivamente; valores superiores a los encontrados en esta investigación.

En cuanto a posicionamiento es posible asociar los porcentajes de arena mayores al área sureste de la zona de estudio y por otra parte los porcentajes más bajos se ubican principalmente en la zona noreste del área de estudio (Figura 3A, Anexo).

**Tabla 7**

*Resumen interpolación del parámetro arena.*

Profundidad (cm)	Rango (% de arena)	Arena		No. Polígonos
		Hectáreas	Porcentaje	
0-30 cm	<=17	2.3139	1.36%	1
	17-22	35.7449	21.07%	3
	22-27	89.5813	52.81%	1
	27-32	33.2522	19.60%	4
	>32	8.7412	5.15%	1
30-60 cm	<=17	0	0%	0
	17-22	60.6744	35.77%	2
	22-27	67.4869	39.78%	3
	27-32	41.4722	24.45%	1
	>32	0	0%	0
60-90 cm	<=17	14.8737	8.8%	1
	17-22	71.936	42.4%	1
	22-27	69.5348	41.0%	2
	27-32	13.289	7.8%	2
	>32	0	0%	0

### 8.2.2. Limo

En cuanto al porcentaje de limo, en las tres profundidades (0-30, 30-60 y 60-90 cm) la clase que predominó fue de 25.3-30.6% con 57.56, 59.43 y 48.16% del área total respectivamente. Por otra parte, se puede observar que la clase que genera el mayor número de polígonos o islas no corresponde a la que predomina en cuanto a área ocupada (Tabla 8).

**Tabla 8**

*Resumen interpolación del parámetro limo.*

Limo				
Profundidad	Rango	Hectáreas	Porcentaje	No. Polígonos
0-30 cm	<=20	0	0%	0
	20-25.3	10.1707	6.00%	10
	25.3-30.6	97.6363	57.56%	7
	30.6-36	60.2875	35.54%	6
	>36	1.539	0.91%	7
30-60 cm	<=20	0.1503	0.09%	2
	20-25.3	20.705	12.21%	7
	25.3-30.6	100.8185	59.43%	6
	30.6-36	46.2583	27.27%	9
	>36	1.7014	1.00%	7
60-90 cm	<=20	1.5922	0.94%	3
	20-25.3	28.0355	16.53%	5
	25.3-30.6	81.6925	48.16%	2
	30.6-36	53.5844	31.59%	6
	>36	4.7289	2.79%	4

De acuerdo a la investigación de Palma et al. (2007), en el área de estudio reportan 24.6, 20.6, y 39.4 % de limo en las profundidades 0-38, 38-70 y 70-99 cm respectivamente; información cercana a la que se reporta en esta investigación al considerar la principal área con mayor porcentaje de limo. Por otra parte, en cuanto al porcentaje de limo CONABIO (2020) reporta en la profundidad 0-5 cm porcentajes en el rango de 17.73-33.51 %, de 32.49-34.52 % en la profundidad 5-15 cm, de 29.30-30.96 % en la profundidad 15-30 cm, de 30-31.60 % en la

profundidad 30-60 cm y de 20.59-32.11 % en la profundidad 60-90 cm datos superiores a los encontrados en esta investigación.

No es posible observar un patrón de distribución claro del porcentaje de limo, puesto que se observa la formación de islas de diferente tamaño y pertenecientes a diferentes rangos por toda el área de estudio, sin embargo, se puede afirmar que el rango de 30.6-36 % fue la que formó las islas de mayor tamaño en todas las profundidades (Figura 4A, Anexo).

### 8.2.3. Arcilla

El porcentaje de arcilla en las tres profundidades que ocupó el mayor superficie fue el del rango de 43-48 %. Además, persiste que las clases con mayor número de polígonos generados, no necesariamente son los que ocupan una mayor área, esto debido a que las clases que ocupan mayor área usualmente generan pocos polígonos, pero de gran tamaño (Tabla 9).

Como se muestra en las Tabla 7, 8 y 9 la cantidad de arcilla es la que predomina en las tres profundidades, con una mayor superficie en la profundidad 0-30 (Tabla 9), lo cual coincide con lo reportado por SEMARNAT (2024) quien clasifica los suelos del área de estudio como suelos arcillosos. Mientras que INIFAP Y CONABIO (1995) clasifican los suelos del área de estudio como gleysoles, coincidiendo con Palma et al. (2007) quien clasifica los suelos del área de estudio como gleysoles mólicos; en este tipo de suelos encontraron porcentajes de la partícula textural arcilla de 34.3, 40.1 y 21.4 % en las profundidades 0-38, 38-70 y 70-99 cm respectivamente, valores que difieren en este estudio con las profundidades de muestreo. Por otra parte, de acuerdo a predicciones en cuanto al contenido de arcilla propuestas por CONABIO (2020), para el área de estudio se encontraron porcentajes de arcilla que van desde 24.3-26.48 % en la profundidad 0-5 cm, de 24.5-26.83 % en la profundidad 5-15 cm, en rango de 28.08-30.20 % en la profundidad 15-30 cm, de 32.33-33.37 % en la profundidad 30-60 cm y de 33.90-35.36 % en la profundidad 60-90 cm, valores inferiores a los que se reportan en esta investigación, esto se debe a que dichos estudios se realizan con puntos de muestreo con grillas hasta más de un kilómetro de separación entre puntos.

En las profundidades 30-60 y 60-90 cm se nota claramente que los valores más altos de porcentaje de arcilla se ubican en el área norte, en cambio en la profundidad 0-30 se nota una distribución casi total del área de estudio del rango 43-48 %; por otra parte, en cuanto al número de islas o polígonos generados por rango, en ninguna de las profundidades el rango con mayor número de polígonos es la que ocupa mayor área (Figura 5A, Anexo).

**Tabla 9**

Resumen interpolación del parámetro arcilla.

Arcilla				
Profundidad	Rango	Hectáreas	Porcentaje	No. Polígonos
0-30 cm	<=43	1.1813	0.70%	8
	43-48	152.4016	89.84%	3
	48-53	15.7473	9.28%	11
	53-58	0.3033	0.18%	3
	>58	0	0%	0
30-60 cm	<=43	3.5832	2.11%	12
	43-48	104.4416	61.57%	7
	48-53	57.7911	34.07%	10
	53-58	3.682	2.17%	8
	>58	0.1356	0.08%	1
60-90 cm	<=43	2.6306	1.55%	9
	43-48	82.9397	48.89%	7
	48-53	60.4983	35.66%	10
	53-58	22.1264	13.04%	8
	>58	1.4385	0.85%	5

### 8.3. Parámetros de humedad del suelo

#### 8.3.1. Punto de marchitez permanente

En los estratos 0-30 y 30-60 cm, el punto de marchitez permanente se presenta en mayor porcentaje en el rango de 21-23.6 % de humedad. En cambio, en la profundidad de 60-90 cm, el mayor porcentaje de área tiene un punto de marchitez permanente igual o por debajo del 21 % de humedad (Tabla 10). En cuanto a su distribución los valores más bajos de PMP se encuentran en la zona sur del área de estudio (Figura 6A, Anexo), esto se debe a que en esta zona existe menor densidad aparente que afecta al PMP, como lo indican Chicas et al. (2014) en su investigación.

Los porcentajes más altos de punto de marchitez permanente son propuestos por Palma et al. (2007) para los suelos gleysoles mólicos los cuales de acuerdo a su cartografía abarcan el área de estudio, estos son 42.1, 36.79 y 32.98 % correspondientes a las profundidades 0-38, 38-70 y 70-99 cm respectivamente; valores que son superiores a los obtenidos en esta investigación.

**Tabla 10**

*Resumen interpolación del parámetro punto de marchitez permanente.*

Punto de marchitez permanente				
Profundidad	Rango	Hectáreas	Porcentaje	No. Polígonos
0-30 cm	<=21	1.1153	0.66%	4
	21-23.6	87.4042	51.53%	3
	23.6-26.2	55.4832	32.71%	4
	26.2-28.8	25.6214	15.10%	2
	>28.8	0.0094	0.01%	1
30-60 cm	<=21	12.8405	7.57%	2
	21-23.6	76.8427	45.30%	2
	23.6-26.2	48.1849	28.41%	4
	26.2-28.8	31.7654	18.73%	2
	>28.8	0	0%	0
60-90 cm	<=21	66.2597	39.06%	3
	21-23.6	43.3595	25.56%	3
	23.6-26.2	28.2266	16.64%	3
	26.2-28.8	29.4795	17.38%	3
	>28.8	2.3082	1.36%	2

### 8.3.2. Capacidad de campo

El mayor porcentaje de área, para capacidad de campo en las tres profundidades se presenta por arriba del 39.5 % de humedad (Tabla 11).

En la profundidad 0-30 cm los mayores valores de capacidad de campo se distribuyen en la zona norte y sureste del área de estudio, en la profundidad 30-60 cm los mayores valores se distribuyen en la zona oeste y sureste, y en la profundidad 60-90 cm los valores más altos se encuentran en la zona norte del área de estudio (Figura 7A, Anexo), esto se relaciona con el contenido de arcilla presente en la zona de estudio.

Porcentajes de capacidad de campo menores a los encontrados fueron reportados por Palma et al. (2007), quienes para el tipo de suelo Gleysol mólico reportan capacidades de campo de 13.91, 16.02 y 8.57 % en las profundidades 0-38, 38-70 y 70-99 cm respectivamente. Sin embargo en el estudio se presentaron datos superiores a los reportados por este autor.

La capacidad de campo y punto de marchitez permanente incrementan significativamente a razón de la profundidad de muestreo, esto coincide con la investigación de Iqbal et al. (2005). De la misma manera Gwak y Kim (2016) quienes evaluaron los factores que afectan la humedad del suelo en suelos de textura limo, franco arenoso, arenoso franco y franco limoso, afirman que la humedad del suelo tiende a incrementar con la profundidad, al mismo tiempo que la variabilidad decrece.

**Tabla 11**

*Resumen interpolación del parámetro capacidad de campo.*

Capacidad de campo				
Profundidad	Rango	Hectáreas	Porcentaje	No. Polígonos
0-30 cm	<=33.5	13.1186	7.73%	2
	33.5-35.5	14.0996	8.31%	4
	35.5-37.5	25.7989	15.21%	6
	37.5-39.5	56.4541	33.28%	3
	>39.5	60.1623	35.47%	6
30-60 cm	<=33.5	0.2154	0.13%	1
	33.5-35.5	14.5882	8.60%	4
	35.5-37.5	24.8224	14.63%	5
	37.5-39.5	43.1476	25.44%	5
	>39.5	86.8599	51.20%	2
60-90 cm	<=33.5	11.458	6.75%	5
	33.5-35.5	15.3611	9.06%	7
	35.5-37.5	41.2946	24.34%	7
	37.5-39.5	39.6142	23.35%	7
	>39.5	61.9056	36.49%	6

### 8.3.3. Porcentaje de humedad a saturación

La mayor cantidad de área para las tres profundidades se encuentra un porcentaje de humedad de saturación entre 57-67.5 %, esto se debe a que son suelos con alto contenido de arcilla de acuerdo a lo reportado por Chicas et al., (2014), además que a mayor densidad aparente del suelo se presenta un incremento del contenido de humedad a saturación del suelo, lo que coincide con Alonso-Báez et al., (2023). En los mapas que se muestran en la figura 8A del Anexo, se registra que en las profundidades 30-60 y 60-90 cm no existe área que tenga humedad a saturación mayor a 67.5% (Tabla 12). Los valores más bajos de humedad a saturación en las tres profundidades se distribuyeron principalmente al suroeste del área de estudio, por otra parte, los valores más altos fueron asociados a la zona norte y noroeste (profundidad 60-90 cm) (Figura 8A, Anexo) en donde se presenta el mayor contenido de arcilla.

**Tabla 12**

*Resumen interpolación del parámetro humedad a saturación.*

Humedad a saturación				
Profundidad	Rango	Hectáreas	Porcentaje	No. Polígonos
0-30 cm	<=57	21.7566	12.83%	3
	57-60.5	45.0581	26.56%	2
	60.5-64	41.8583	24.68%	4
	64-67.5	53.5889	31.59%	3
	>67.5	7.3716	4.35%	1
30-60 cm	<=57	1.9085	1.13%	2
	57-60.5	56.262	33.17%	3
	60.5-64	59.5327	35.09%	4
	64-67.5	51.9303	30.61%	2
	>67.5	0	0%	0
60-90 cm	<=57	0	0%	0
	57-60.5	55.2091	32.55%	3
	60.5-64	85.3936	50.34%	2
	64-67.5	29.0308	17.11%	1
	>67.5	0	0%	0

La distribución de las propiedades del suelo referentes a la retención de humedad está estrechamente relacionada con los patrones de distribución de contenido de arena y arcilla, asimismo existe una relación negativa entre el contenido de arena y la capacidad de campo, punto de marchitez permanente y humedad a saturación; se suele encontrar una relación positiva entre el contenido de arcilla y la capacidad de campo y punto de marchitez permanente (Reza et al. 2016).

#### **8.4. Láminas de almacenamiento de agua**

Más de 50 % del área total, considerando el estrato 0-90, tiene una lámina hasta el PMP de entre 21.964 y 25.112 cm. Por otra parte, más de 60 % del área tiene una lámina hasta la humedad de capacidad de campo entre 37.92 y 41.85 cm. En cuanto a la lámina hasta el punto de humedad a saturación se encontró que más de 80 % del área está entre 60.97 y 66.26 cm (Tabla 13).

En este estudio la lámina de reposición se agrupó en 5 clases:  $\leq 12.9$ , 12.9-14.59, 14.59-16.28, 16.28-17.97 y  $> 17.9$  cm, cerca de 90% del área total tiene una lámina de reposición de entre 12.9 y 17.97 cm, por lo que se entiende que es mínima el área por debajo de 12.9 cm y por arriba de 17.9 cm, la mayoría del área se distribuye entre las clases intermedias. Igualmente se entiende que existe una distribución espacial variante. Al tener una tasa de irrigación variable se evitan los problemas de estrés por déficit hídrico en las plantas y también la contaminación de aguas subterráneas por escorrentía y percolación del nitrógeno (Reza et al. 2016). En esta misma línea, Iqbal et al. (2005) mencionan la cartografía enfocada a modelar la capacidad de retención de humedad de los suelos muestra que existe variación espacial en las capacidades de retención de humedad de los suelos de diferentes texturas, lo que coincide en esta investigación en donde la Da, PMP y CC afectan la lámina de reposición.

La lámina almacenada en el suelo hasta el punto de marchitez permanente exhibió los valores más altos en la zona noroeste del área de estudio, con respecto a la lámina hasta la capacidad de campo muestra una distribución muy similar a la profundidad 30-60 de este mismo parámetro, donde se ubican los mayores valores en la zona oeste y sureste del área de estudio, por otra parte, la lámina de humedad a saturación muestra que asocia sus valores más altos hacia la zona norte del área de estudio (Figura 9A, Anexo).

**Tabla 13**

Resumen interpolación de las láminas de humedad del suelo.

Láminas de humedad del suelo				
Humedad	Rango (cm)	Hectáreas	Porcentaje	No. Polígonos
Punto de marchitez permanente	<=21.964	23.0963	13.62%	3
	21.964-23.538	59.949	35.34%	2
	23.538-25.112	40.4148	23.82%	2
	25.112-26.686	20.2532	11.94%	2
	>26.686	25.9202	15.28%	1
Capacidad de campo	<=35.95	10.3748	6.12%	3
	35.95-37.92	25.9685	15.31%	4
	37.92-39.88	42.7273	25.19%	6
	39.88-41.85	67.8515	40.00%	2
	>41.85	22.7114	13.39%	3
Saturación	<=60.97	13.8071	8.14%	5
	60.97-62.73	53.4544	31.51%	4
	62.73-64.50	40.0291	23.60%	4
	64.50-66.26	49.6009	29.24%	2
	>66.26	12.742	7.51%	3
Lamina de reposición	<=12.9	3.9146	2.31%	3
	12.9-14.59	43.4423	25.61%	4
	14.59-16.28	62.5793	36.89%	7
	16.28-17.97	45.9337	27.08%	2
	>17.9	13.7636	8.11%	3

### 8.5. Distribución espacial de las propiedades del suelo

La distribución de las partículas texturales a menudo es asociada con una localización cardinal en las áreas de estudio, al respecto, Reza et al. (2016) encontraron que el contenido de arena fue mayor en el noroeste de su área de estudio, aunado a bajos valores de retención de humedad en capacidad de campo, punto de marchitez permanente y humedad a saturación; esto coincide con la información obtenida en este estudio con respecto a la similitud de la información

de las variables evaluadas aunque son diferentes áreas de estudio. Mientras que Varón et al. (2022) utilizaron algoritmos de machine learning para predecir la distribución de las fracciones de arena, limo y arcilla en todo el territorio colombiano, afirman las partículas de arena fueron las que mostraron la mayor variabilidad en todas las profundidades (0-5, 5-15, 15-30, 30-60, 60-100 cm). Por otra parte, resultado del mapeo con Kriging Iqbal et al. (2005) en su estudio en el cual evaluaron la variabilidad espacial de las propiedades físicas de suelos aluviales, encontraron suelos con alto contenido de arena y bajo contenido de arcilla en la parte oeste del área de estudio, asimismo han reportado bajos porcentajes de arena y altos porcentajes de arcilla en la parte sureste, afirmando que los suelos con altos porcentajes de arena tenían un posicionamiento espacial similar a los suelos con baja retención de humedad a CC y PMP. De acuerdo a lo mencionado, existe una relación entre las propiedades físicas del suelo y la variabilidad espacial entre ellas.

De acuerdo a la Tabla 14, se observan valores de asimetría positivos en los parámetros arcilla, limo y punto de marchitez permanente de la profundidad 0-30 cm, por lo que se entiende que la mayor parte de los datos en estos tres parámetros se distribuyen hacia la izquierda de la media aritmética, es decir en el caso de arcilla la mayor parte de los valores se encuentran por debajo de 46.757%, en limo por debajo de 28.984% y en PMP por debajo de 24.007%.

Por otra parte, observando valores de asimetría negativos en los parámetros arena, densidad aparente, capacidad de campo y saturación se sabe la mayor parte de los datos se encuentran distribuidos hacia la derecha, dicho de otra forma, la mayor parte de los datos son mayores a sus respectivas medias.

Los valores de curtosis negativos presentes en todos los parámetros de la profundidad 0-30 cm, se entiende obedecen a un tipo de distribución platicúrtica (Tabla 14), por lo que se puede deducir que existe una cantidad de valores por pixel resultantes de la interpolación que se repiten pocas veces, esto al presentar un mayor rango de datos que no se concentran alrededor de la media.

Los resultados de los parámetros descriptivos de la profundidad 30-60 (Tabla 15), muestran que todos los parámetros a excepción de capacidad de campo y saturación mostraron una asimetría positiva. En cuanto a la curtosis, todos los parámetros mostraron curtosis negativas, en base a lo cual se afirman todos los parámetros obedecen a una distribución platicúrtica.

**Tabla 14**

*Estadística descriptiva de los parámetros del suelo en la profundidad 0-30 cm.*

Parámetro	Media	Desviación estándar	Varianza de la muestra	Valor mínimo	Valor máximo	Asimetría	Curtosis
Arcilla	46.757	3.899	15.2039	40.24	54.52	0.33	-0.8
Arena	26.379	6.181	38.2035	11.98	36.76	-0.01	-0.67
Limo	28.984	5.008	25.082	20.72	37.8	0.39	-1
Densidad aparente	1.144	0.045	0.00203	1.08	1.22	-0.19	-1.53
Capacidad de campo	37.912	3.462	11.9852	30.65	42.87	-0.60	-0.56
Punto de marchitez permanente	24.007	2.792	7.79778	19.02	29.72	0.34	-0.87
Saturación	61.74	4.179	17.4657	53.95	67.97	-28 (0.36)	-1.31

En la profundidad de 60-90 cm se reportaron con asimetría positiva los parámetros arcilla, arena, limo, densidad aparente, punto de marchitez permanente y saturación, capacidad de campo tiene asimetría negativa; asimismo en referencia a la curtosis todos los parámetros mostraron tener una distribución platicúrtica a excepción del limo que obedece a una distribución leptocúrtica (Tabla 16). Mientras que en un estudio de otra localidad se reporta algunos parámetros de asimetrías que van de 0.41-0.82 en el parámetro arcilla, de 0.13-0.46 en arena y de 0.46-0.71 en limo, y curtosis en los rangos (-)0.55-(+)0.43, (-)0.83-(-)0.72, y 0-0.33 para arcilla, arena y limo respectivamente (Varón et al., 2022), esto significa que los valores de asimetría y curtosis varían con el tipo de textura y otras propiedades físicas del suelo. Por otro lado, en un estudio realizado en la Región Pampeana sur, en Buenos Aires Argentina donde predominan los suelos Argiudoles, Castro et al. (2018) encontraron que las partículas de arena fueron las que más variación presentaron, así también notaron disminución en el contenido de arcilla y limo de este a oeste; por lo que esto no da pauta para decir que todos los suelos presentan una correlación entre las propiedades físicas del suelo y los parámetros estadísticos, de acuerdo a los datos.

**Tabla 15**

*Estadística descriptiva de los parámetros del suelo en la profundidad 30-60 cm.*

Parámetro	Media	Desviación estándar	Varianza de la muestra	Valor mínimo	Valor máximo	Asimetría	Curtosis
Arcilla	47.968	6.174	38.1298	37.129	60.52	0.21	-0.85
Arena	23.772	5.741	32.9546	14.46	36.04	0.16	-0.74
Limo	28.708	5.387	29.02	18.02	30.44	0.24	-0.86
Densidad aparente	1.132	0.059	0.00352	1.04	1.25	0.20	-1.13
Capacidad de campo	39.144	4.013	16.1052	31.05	45.99	-0.41	-0.76
Punto de marchitez permanente	24.141	3.242	10.5136	18.8	29.32	0.14	-1.15
Saturación	62.188	3.761	14.1488	55	67.82	-0.33	-1.1

En el sudeste de China donde se estudió la variabilidad espacial de la densidad aparente de suelos fluvisoles, en donde Shan et al. (2019) reportan densidades aparentes con media de  $1.26 \text{ g cm}^3$  en la profundidad 0-20 cm, asimetría de -0.1 curtosis de -0.15, en la profundidad 20-40, 40-60 y 60-100 cm, con media de  $1.54 \text{ g cm}^3$ , asimetría de -0.66, -0.94 y -0.63 y curtosis de 0.21, 1.30 y 0.60 respectivamente, en un área de estudio donde predominan los paddy soils y los suelos aluviales. Mientras que en esta investigación en las tres profundidades de muestreo se presentó una curtosis negativa menor a menos uno.

Además, en un estudio realizado en Ecuador para un suelo andisol, con la variable de densidad aparente se encontró que la curtosis y asimetría fueron cercanos a cero en diferentes profundidades del suelo (Salamanca et al., 2018). Además, estos autores encontraron que la densidad aparente disminuye con la profundidad, sin embargo, en este estudio esto solo se cumple con las profundidades 0-30 y 30-60 (Tabla 14 y 15).

**Tabla 16**

*Estadística descriptiva de los parámetros del suelo en la profundidad 60-90 cm.*

Parámetro	Media	Desviación estándar	Varianza de la muestra	Valor mínimo	Valor máximo	Asimetría	Curtosis
Arcilla	49.406	7.143	51.026	36.68	63.24	0.14	-1.11
Arena	21.746	6.449	41.5869	10.32	36.04	0.43	-0.59
Limo	28.406	5.888	36.6684	17.44	42.01	0.21	0.59
Densidad aparente	1.144	0.061	0.063	1.04	1.26	0.17	-1.12
Capacidad de campo	38.788	5.026	25.2532	28.88	46.04	-0.37	-0.85
Punto de marchitez permanente	22.88	3.873	15.00215	16.39	29.7	0.06	-1.18
Saturación	61.862	3.738	13.976	56.97	68.78	0.19	-1.32

Con relación a la estadística de las láminas de agua almacenadas en el estrato 0-90 cm hasta el contenido de humedad de los parámetros de PMP, CC, punto a saturación y la lámina de reposición, en general todas mostraron una asimetría positiva, excepto la de capacidad de campo; asimismo todas tiene una curtosis platicúrtica (Tabla 17).

**Tabla 17**

*Estadística descriptiva de las láminas.*

Lámina	Media	Desviación estándar	Varianza de la muestra	Valor mínimo	Valor máximo	Asimetría	Curtosis
Capacidad de campo	39.37	1.782	3.177	34.21	43.64	-0.27	-0.3
Punto de marchitez permanente	23.992	1.772	3.1393	20.48	28.48	0.34	-0.70
Saturación	63.432	1.813	3.2858	59	68.05	0.10	-0.66
Reposición	15.378	1.421	2.017	11.42	19.63	0.21	-0.02

Para las profundidades 0-30, 30-60 y 60 90 cm la estadística descriptiva de las láminas de agua almacenadas hasta el contenido de humedad de los parámetros de PMP, CC, punto a saturación y la lámina de reposición, no se encontró una relación entre el parámetro estadístico de asimetría con respecto a la profundidad, sin embargo, con respecto a la curtosis en todas las profundidades fue negativa es decir tienen una forma platicúrtica (Tablas 18, 19 y 20).

**Tabla 18**

*Estadística descriptiva de láminas de agua almacenada a la profundidad 0-30 cm.*

Lámina	Media	Desviación estándar	Varianza de la muestra	Valor mínimo	Valor máximo	Asimetría	Curtosis
Capacidad de campo	12.879	0.683	0.46584	11.24	14.31	-0.15	-0.54
Punto de marchitez permanente	8.235	0.46	0.21141	7.26	9.58	0.27	-0.71
Saturación	21.334	0.914	0.83453	19.23	23.4	-0.12	-0.66
Reposición (100%)	4.644	0.678	0.45916	3.16	6.16	0.53	-0.44

**Tabla 19**

*Estadística descriptiva de láminas de agua almacenada a la profundidad 30-60 cm.*

Lámina	Media	Desviación estándar	Varianza de la muestra	Valor mínimo	Valor máximo	Asimetría	Curtosis
Capacidad de campo	13.202	0.57	0.3254	11.84	14.39	0.36	-0.54
Punto de marchitez permanente	8.082	0.542	0.29357	6.81	9.51	0.13	-0.41
Saturación	20.983	0.638	0.40643	19.48	22.6	-0.12	-0.68
Reposición (100%)	5.12	0.517	0.26763	3.58	6.54	0.30	-0.11

**Tabla 20**

*Estadística descriptiva de láminas de agua almacenada a la profundidad 60-90 cm.*

Lámina	Media	Desviación estándar	Varianza de la muestra	Valor mínimo	Valor máximo	Asimetría	Curtosis
Capacidad de campo	13.272	0.967	0.93547	10.8	15.89	0.06	-0.57
Punto de marchitez permanente	7.668	0.974	0.94803	5.84	10.05	0.17	-0.88
Saturación	21.11	0.869	0.75548	19.22	23.59	0.25	-0.74
Reposición (100%)	5.604	0.815	0.6648	2.83	7.4	-0.28	-0.50

## 8.6 Semivariogramas

### 8.6.1. Propiedades físicas del suelo

En la profundidad 0-30 cm los parámetros arcilla, arena y punto a saturación presentaron el mejor modelo de ajuste el gaussiano; y para las propiedades de limo y capacidad de campo con el modelo esférico y el punto de marchitez permanente y densidad aparente con el modelo exponencial. Se encontraron porcentajes de nugget que van desde 0.00001 a 21.09% y se hallaron  $R^2$  en el rango de 0.536 a 0.919 (Tabla 21). Los parámetros, arena y punto de marchitez permanente fueron los que mostraron un mejor ajuste al modelo estadístico, por el contrario, arcilla fue el que exhibió el menor  $R^2$ .

**Tabla 21**

*Características de los modelos de semivariograma en la profundidad 0-30 cm.*

Parámetro	Modelo	$C_0$ Nugget (%)	$C_0+C$ Sill	$A_0$ Rango (m)	Varianza estructural (%)	Modelo $R^2$
Arcilla	Gaussiano	0.1	14.68	216.5064	99.9	0.536
Arena	Gaussiano	21.09	47.1	1039.2305	55.2	0.919
Limo	Esférico	0.01	24.65	195	100	0.733

Densidad aparente	Exponencial	0.00001	0.002442	1038	100	0.83
Capacidad de campo	Esférico	0.96	12.22	464	92.1	0.806
Punto de marchitez permanente	Exponencial	1.17	9.313	990	87.4	0.906
Saturación	Gaussiano	6.6	43.2	1376.98	84.7	0.87

De acuerdo a la Tabla 22, referente a la profundidad 30-60 cm, los semivariogramas se ajustaron a los modelos gaussiano y esférico dependiendo la propiedad del suelo. Se registraron  $R^2$  que van desde 0.5 a 0.931, los valores del rango oscilan entre 212 y 1299 m y se encontraron porcentajes de nugget que van desde 0.0001 a 14.18%. El resultado de la interpolación del parámetro arena se puede considerar como el más cercano a la realidad debido al tiene un  $R^2$  mayor a 0.9 (Figura 3A, Anexo).

**Tabla 22**

*Características de los modelos de semivariograma en la profundidad 30-60 cm.*

Parámetro	Modelo	$C_0$ Nugget (%)	$C_0+C$ Sill	$A_0$ Rango (m)	Varianza estructural (%)	Modelo $R^2$
Arcilla	Gaussiano	3.3	38.08	244.21	91.3	0.878
Arena	Esférico	14.18	40.71	1299	65.2	0.905
Limo	Esférico	0.01	29.58	212	100	0.616
Densidad aparente	Gaussiano	0.0001	0.00421	304.84	99.8	0.759
Capacidad de campo	Esférico	5.38	15.2	447	66.8	0.5
Punto de marchitez permanente	Esférico	2.77	12.38	858	77.6	0.9
Saturación	Esférico	2.29	26.02	732	85.7	0.931

Los semivariogramas en la profundidad 60-90 cm se ajustaron a los modelos exponencial, esférico y gaussiano. Se encontraron  $R^2$  que van desde 0.595 a 0.979, el porcentaje de nugget fue desde 0.00015 a 25.2%, y en el rango se registraron valores que fueron desde 271 a 6132 m. El parámetro arena fue el que registró el mayor porcentaje de nugget y el coeficiente de determinación más bajo (Tabla 23).

Para la variable densidad aparente Shan et al. (2019) reportan el modelo exponencial que fue el que presentó un mejor ajustó a los datos para la profundidad 0-20 cm, el modelo esférico para las profundidades 20-40 cm y 40-60 cm, y el gaussiano para la profundidad 60-100 cm,  $R^2$  de 0.414, 0.662, 0.697 y 0.846 para cada profundidad respectivamente y con valores de nugget de entre 0.0004 y 0.0037 %. Mientras que Salamanca et al. (2018), reportan que el modelo esférico fue que tiene mejor ajuste en su investigación, modelo que es similar sólo en la profundidad 60-90 cm. Sin embargo, estas investigaciones de estudios para otros suelos por ello difiere con la obtenida en esta investigación, además con ello se muestra que no todos los suelos presentan un mismo modelo y que el  $R^2$  no precisamente es mayor a 0.8.

**Tabla 23**

*Características de los modelos de semivariograma en la profundidad 60-90 cm.*

Parámetro	Modelo	$C_0$ Nugget (%)	$C_0+C$ Sill	$A_0$ Rango (m)	Varianza estructural (%)	Modelo $R^2$
Arcilla	Gaussiano	0.1	47.41	259.8076	99.8	0.699
Arena	Exponencial	25.2	81.4	6132	69	0.595
Limo	Esférico	0.1	38.43	271	99.7	0.739
Densidad aparente	Esférico	0.00015	0.00382	388	96.1	0.944
Capacidad de campo	Gaussiano	0.54	26.32	462.45		0.979
Punto de marchitez permanente	Esférico	0.01	20.33	978	100	0.976
Saturación	Esférico	5.23	21.13	2110	75.2	0.919

### 8.6.2. Láminas de agua almacenadas

Los semivariogramas de las láminas agua almacenadas hasta capacidad de campo, punto de marchitez permanente y de reposición para el estrato 0-90 cm se ajustaron al modelo gaussiano, en cambio la lámina de saturación se ajustó al modelo esférico, todas las anteriores con valores de  $R^2$  que van desde 0.979 a 1, por otra parte. El porcentaje de nugget va desde 0.01 a 0.12, por lo que se intuye la aleatoriedad en las láminas es poca y se puede tener una alta confianza en las láminas generadas (Tabla 24).

Con respecto a los parámetros de las láminas almacenadas en las profundidades de 0-30, 30-60 y 60-90 cm presentaron coeficientes mayores a 0.9 esto significa que los datos se ajustaron adecuadamente a los modelos, los cuales en general fueron los Gaussianos y los esféricos (Tablas 25, 26 y 27). Además, el nugget fue en general menor a 0.1 excepto para la profundidad de 60-90 cm en todos los parámetros.

El efecto nugget o efecto pepita no puede ser tomada como una medida del error, se le puede definir de mejor manera como un fenómeno que representa la aleatoriedad presente en las variables regionalizadas, y su valor (Camana y Deutsch, 2019), sin embargo, es un valor que contribuye a determinar la calidad de los datos. Por otro lado, aun cuando la separación espacial entre una y otra muestra sea insignificante existirá variabilidad, discrepancia entre muestras tomadas una al lado de otra complica el proceso de interpolación debido a la alta variabilidad del parámetro; por lo que el efecto nugget se puede tomar como una medida cuantitativa del nivel de variabilidad entre muestras ubicadas a distancias muy cercanas (Gill, 2009). Por lo que, los parámetros con pequeños porcentajes de nugget deberían tener baja variabilidad, mostrando una distribución homogénea y predecible, por el contrario, parámetros con efecto nugget alto se consideran tienen una alta aleatoriedad, y por lo tanto las predicciones son poco confiables.

**Tabla 24**

*Características de los modelos de semivariograma de las láminas.*

Lámina	Modelo	C <sub>0</sub> Nugget (%)	C <sub>0</sub> +C Sill	A <sub>0</sub> Rango (m)	Varianza estructural (%)	Modelo R <sup>2</sup>
Capacidad de campo	Gaussiano	0.01	3.185	441.67	0.997	0.99
Punto de marchitez permanente	Gaussiano	0.12	4.124	888.542	0.971	1
Saturación	Esférico	0.01	3.552	871	0.997	0.979
Reposición	Gaussiano	0.075	2.266	455.529	0.967	0.991

**Tabla 25**

*Características de los modelos de semivariograma de las láminas de agua almacenada a la profundidad 0-30 cm.*

Lámina	Modelo	C <sub>0</sub> Nugget (%)	C <sub>0</sub> +C Sill	A <sub>0</sub> Rango (m)	Varianza estructural (%)	Modelo R <sup>2</sup>
Capacidad de campo	Gaussiano	0.001	0.53	464.18	0.998	0.955
Punto de marchitez permanente	Gaussiano	0.0424	0.27	1364.856	0.845	0.983
Saturación	Gaussiano	0.063	0.986	566.3806	0.936	0.994
Reposición	Gaussiano	0.079	0.538	777.6908	0.853	0.922

**Tabla 26**

*Características de los modelos de semivariograma de las láminas de agua almacenada a la profundidad 30-60 cm.*

Lámina	Modelo	C <sub>0</sub> Nugget (%)	C <sub>0</sub> +C Sill	A <sub>0</sub> Rango (m)	Varianza estructural (%)	Modelo R <sup>2</sup>
Capacidad de campo	Gaussiano	0.012	0.368	464.1896	0.967	0.904
Punto de marchitez permanente	Gaussiano	0.005	0.376	748.24	0.987	0.988
Saturación	Gaussiano	0.058	0.467	642.5908	0.876	0.983
Reposición	Gaussiano	0.0109	0.316	519.6152	0.966	0.983

**Tabla 27**

*Características de los modelos de semivariograma de las láminas de agua almacenada a la profundidad 60-90 cm.*

Lámina	Modelo	C <sub>0</sub> Nugget (%)	C <sub>0</sub> +C Sill	A <sub>0</sub> Rango (m)	Varianza estructural (%)	Modelo R <sup>2</sup>
Capacidad de campo	Esférico	0.081	1.746	2602	0.954	0.99
Punto de marchitez permanente	Gaussiano	0.039	1.196	862.5613	0.967	1
Saturación	Gaussiano	0.153	0.933	1066.9433	0.836	0.973
Reposición	Gaussiano	0.139	0.668	762.1024	0.999	0.989

Se puede decir que el efecto nugget describe si un parámetro al ser muestreado nuevamente en la misma localización dará o no resultados similares (Gill, 2009). El parámetro arena presentó los porcentajes de nugget más altos para las tres profundidades. El modelo con el ajuste más bajo fue para capacidad de campo en la profundidad 30-60 cm, sin embargo, este mismo parámetro en la profundidad 60-90 cm mostró el R<sup>2</sup> más alto. En las figuras de la 17A a la 51A se muestran los semivariogramas para cada variable evaluada.

## IX. Conclusión

Las láminas de almacenamiento de agua para el estrato 0-90 cm presentan una distribución espacial no homogénea en el área de estudio de 168 ha de la finca "La Victoria" Teapa, Tabasco; esto para las láminas almacenadas con los contenidos de humedad hasta el punto de marchitez permanente, capacidad de campo, humedad a saturación y de reposición entre el porcentaje de capacidad de campo y punto de marchitez permanente. Además, la aplicación de los sistemas de información geográfica ayudó a determinar las áreas potenciales de mayor almacenamiento de agua en el estrato 0-90 cm.

La construcción de mapas con el uso de los SIG, contribuyen a la visualización de las áreas de mayor y menor cantidad de agua almacenada en el suelo para la finca "La Victoria".

Las propiedades físicas del estrato 0-90 cm del suelo determinaron el contenido de agua almacenada en dicho estrato, el cual fue afectado por la densidad aparente, la capacidad de campo, el punto de marchitez permanente, así como el punto a saturación de los estratos 0-30, 30-60 y 60-90 cm.

El uso de los semivariogramas determina la posible separación de puntos de muestreo para cada propiedad del suelo.

## X. Referencias citadas

- Aguilera C., M. y Martínez E., R. (1996). Relaciones agua suelo planta atmósfera. Universidad Autónoma Chapingo. Mexico, 304 p.
- Alemán B., Henríquez C., Largaespada K. y Ramírez T. (2022). Evaluación de Flecha Seca en palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.) mediante imágenes multiespectrales, Costa Rica. *Agronomía Mesoamericana*, 33(2): 47557. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agromeso/index>
- Alonso-Báez, M., López-Guillen, G., & Grajales-Solís, M. (2023). Mejoramiento de las propiedades hidráulicas del suelo en el cultivo de soya mediante el subsuelo. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 14(5), 78-89. Epub 15 de septiembre de 2023. <https://doi.org/10.29312/remexca.v14i5.3102>
- Andrade M., E., De Niz L., E. M., Benítez M., M. A., Olgún L., J. L., Guevara G., R. D., Meza R., D. & Villalvazo L., V. M. (2019). Identificación de áreas aptas para la agricultura de temporal con maíz y frijol en la Cuenca de Autlán, Jalisco, México. *Revista Geográfica de América Central*, (62): 17-48. <https://dx.doi.org/10.15359/rgac.62-1.1>
- Arcia Porrúa, J. (2020). De la agricultura precisa a la agricultura de precisión. *Revista Ingeniería Agrícola*, 10(3): 62-71. Recuperado de <https://rcta.unah.edu.cu/index.php/IAgric/article/view/1269/2216>
- Banco Mundial (05 octubre 2022). *El agua en la agricultura*. Banco Mundial. <https://www.bancomundial.org/es/topic/water-in-agriculture>
- Barrera L., J., Barrezueta U., S., & García B., R. M. (2020). Evaluación de los índices de calidad del suelo de diversos cultivos en diferentes condiciones topográficas. *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas*, 3(1):182-190.
- Baxendale, C. & Buzai, G. (2011). Análisis Espacial con Sistemas de Información Geográfica. Aportes de la Geografía para la elaboración del Diagnóstico en el Ordenamiento Territorial. *Fronteras*. 10: 25-38.
- Bejar P., S. J., Cantú S., I., Yáñez D., M. I., & Luna R., E. O. (2020). Curvas de retención de humedad y modelos de pedotransferencia en un Andosol bajo distintos usos de suelo. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 11(59): 31-50. Epub 15 de julio de 2020. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i59.666>

- Best, S. (2006). Tecnología de riego variable En R. Bongiovanni, E. Chartuni, S. Best y Á. Roel (Eds.), *Agricultura de precisión: Integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable*. pp. 65-80. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. <http://repositorio.iica.int/handle/11324/7408>
- Best, S. (2011). *Handbook de agricultura de precisión* [en línea]. Chillán, Chile: Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.14001/68410>
- Bravo T., D. A. y Moreno B., A. F. (2007). Planeación de los recursos hídricos del sistema de riego campana - malacatus, utilizando sistemas de información geográfica. [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional de Loja]. <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/handle/123456789/5275>
- Buzai, G. D., Montes Galbán, E. J. (2021). Estadística Espacial: Fundamentos y aplicación con Sistemas de Información Geográfica; Universidad Nacional de Luján. Instituto de Investigaciones Geográficas; 9: 232.
- Caicedo, L.C., Méndez A.F.J., Gutiérrez, Z.E., Flores, C.J.J. (2021) Medición de humedad en suelos: Revisión de métodos y características. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 9(17): 1-8. <http://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/595/5952727005/index.html>
- Camana, F.A. & Deutsch, C.V. (2019). The Nugget Effect. *J.L. Deutsch (Ed.), Geostatistics Lessons 1*, 1-6. <http://geostatisticslessons.com/lessons/nuggeteffect>
- Canto S., E. A., Inga C., J. A., Macías H., D. J. y Martínez C., T. F. (2022). Los sistemas de información geográfica aplicados a la agricultura de precisión. *Revista Científica Arbitrada Multidisciplinaria PENTACIENCIAS*, 4(3): 62-76. <https://editorialalema.org/index.php/pentaciencias/article/view/131/182>
- Castro F., M., Domenech, M. B., Borda, M. R., y Costa, J. L. (2018). A spatial dataset of topsoil texture for the southern Argentine Pampas. *Geoderma Regional*, 12, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2017.11.003>
- Chávez, P., Cachipundo, C., Pulamarín, L. y Sandoval, J. (2020). Sistemas de información geográfica aplicados al riego. Editorial ABYA YALA Universidad Politécnica Salesiana. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/19502>

- Chicas S., R. A., Vanegas C., E. A., & García Á., N. (2014). Determinación indirecta de la capacidad de retener humedad en suelos de la subcuenca del río Torjá, Chiquimula, Guatemala. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* , 23 (1), 41-46. Recuperado en 07 de agosto de 2024, de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2071-00542014000100007&lng=es&tlng=en](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542014000100007&lng=es&tlng=en)
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA] (2023). Normales climatológicas por estado. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/normales-climatologicas-por-estado?estado=tab>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [CONABIO] (2020). Edafología – Mapeo digital de suelos – Propiedades del suelo – 1000m. Catálogo de metadatos geográficos. [http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis\\_root/edafo/edfmdsuelo/edfmcsue/edfmcsu1m/cly\\_05cm\\_pgw](http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/edafo/edfmdsuelo/edfmcsue/edfmcsu1m/cly_05cm_pgw)
- Costa, A., Albuquerque, J. A., Costa, A., Pértile, P., & Silva, F. R. (2013). Water retention and availability in soils of the State of Santa Catarina-Brazil: effect of textural classes, soil classes and lithology. *Revista Brasileira De Ciência Do Solo*, 37(6): 1535–1548. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000600010>
- Dávila L., D. E. (2022). Evaluación técnica de un sistema de riego por aspersion para el cultivo de banano (*Musa Paradisiaca L.*) en la Hacienda El paban, Ecuador [Tesis de licenciatura, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano]. <https://bdigital.zamorano.edu/handle/11036/7265>
- DOF (2002). Norma oficial mexicana. NOM-021-RECNAT-2000. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf>
- Doumet C., Y., Cruz R., B., y Mendoza M., I. (2021). Sistemas de información geográfica para diagnósticos turísticos territoriales. *Sosquua*, 3(2): 69–84. <https://doi.org/10.52948/sosquua.v3i2.518>
- Duarte P. y Montaña C. (2020). Manual de procedimientos para elaboración de mapas de variabilidad espacial de suelos y su aplicación en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras [Tesis de Licenciatura, Escuela Agrícola Panamericana]. <https://bdigital.zamorano.edu/handle/11036/6870>

- Espinosa P., R. R. y Machado G., N. (2022). Cartografía Colaborativa para el Manejo Integrado de Plagas: Revisión y análisis. *Revista Ciencia Universitaria*, 20(3): <https://rcta.unah.edu.cu/index.php/ACUNAH/article/view/1651/3242>
- Fairbridge, Rh. W.; Finkl, CH. W. (1979). *The encyclopaedia of soil science. Part 1*. Dowden Hutchinson and Ross, Inc.
- Food and agriculture organization [FAO]. (2006). Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. <https://www.fao.org/4/x0490s/x0490s.pdf>
- Food and Agriculture Organization [FAO]. (2013). *Portal de Suelos de la FAO*. <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/sistemas-numericos/propiedades-quimicas/es/>
- Food and Agriculture Organization [FAO]. (2012). Textura del suelo. [https://www.fao.org/fishery/static/FAO\\_Training/FAO\\_Training/General/x6706s/x6706s06.htm](https://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s06.htm)
- Food and Agriculture Organization [FAO]. (2005). Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal El significado de la porosidad del suelo. Editorial FAO. <https://www.fao.org/3/y4690s/y4690s00.htm#Contents>
- García R., R. A., Villazón G., J. A., & Rodríguez R., A. W. (2021). Sensoramiento remoto del rendimiento agrícola en caña de azúcar en Cacocum, Cuba. *Temas Agrarios*, 26(2):152-159. <https://doi.org/10.21897/rta.v26i2.2763>
- Gill, Sarah-Jane. (2009). *The nugget effect*[Tesis de maestría, Rhodes University]. [https://www.researchgate.net/publication/316878381\\_The\\_nugget\\_effect](https://www.researchgate.net/publication/316878381_The_nugget_effect)
- Guerrero H., B. G., Vélez M., F. J. y Morales Q., D. E. (2019). Energía eólica y territorio: sistemas de información geográfica y métodos de decisión multicriterio en La Guajira (Colombia). *Ambiente y Desarrollo*, 23(44). <https://doi.org/10.11144/Javeriana.ayd23-44.eets>
- Gwak, Y., & Kim, S. (2016). Factors affecting soil moisture spatial variability for a humid forest hillslope. *Hydrological Processes*, 31(2), 431–445. <https://doi.org/10.1002/hyp.11039>
- Hossne G., A. J. (2008). La densidad aparente y sus implicaciones agrícolas en el proceso expansión/contracción del suelo. *Terra Latinoamericana*, 26(3), 195-202.

[http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0187-57792008000300001&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792008000300001&lng=es&tlng=es).

Humacata, Luis (2020). Sistemas de Información Geográfica. *Aplicaciones para el análisis de clasificación espacial y cambios de usos del suelo*. Colección Espacialidades. Instituto de Investigaciones Geográficas (INIGEO). <http://www.inigeo.unlu.edu.ar/?q=node/24>

Instituto Nacional de Estadística Y Geografía [INEGI]. (2017). Anuario estadístico y geográfico de Tabasco 2017. [https://www.datatur.sectur.gob.mx/itxef\\_docs/tab\\_anuario\\_pdf.pdf](https://www.datatur.sectur.gob.mx/itxef_docs/tab_anuario_pdf.pdf)

Instituto Nacional de investigaciones Forestales y Agropecuarias [INIFAP] y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [CONABIO]. (1995). Edafología. Geoportal del Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad (SNIB). <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>

Iqbal, Javed., Thomasson, J., Jenkins, Johnie., Owens, Phillip. y Whisler, Frank. (2005). Spatial Variability Analysis of Soil Physical Properties of Alluvial Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 69, 1338-1350. [https://www.researchgate.net/publication/43256103\\_Spatial\\_Variability\\_Analysis\\_of\\_Soil\\_Physical\\_Properties\\_of\\_Alluvial\\_Soils](https://www.researchgate.net/publication/43256103_Spatial_Variability_Analysis_of_Soil_Physical_Properties_of_Alluvial_Soils)

Israelsen, O. y V. Hansen. 1979. Principios y aplicaciones del riego. Ed. Reverté.

Jabro, J., Evans, R., Kim, Y., & Iversen, W. (2009). Estimating in situ soil–water retention and field water capacity in two contrasting soil textures. *Irrigation Science*, 27, 223-229. <https://doi.org/10.1007/s00271-008-0137-9>.

Jaramillo J., D. F. (2012). Variabilidad espacial del suelo: Bases para su estudio. *Revista de la Facultad de Ciencias Universidad Nacional de Colombia*, 1(1): 73-87. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rfc/article/download/49004/50077>

Jiménez P., P. A., Rodríguez Z., K. V., y Escobedo B., F. E. (2021). Sistema de información geográfica para el registro de actos delictivos como soporte de las comisarías usando el API de ArcGis: Geographic information system for the registration of criminal acts to support police stations using the ArcGis API. *Investigación Universitaria UNU*, 11(1): 540–548. <https://doi.org/10.53470/riu.v11i1.16>

Li, J. y Li, X. (2022). Spatial Variability. In: Cui, W., Fu, S., Hu, Z. (eds) *Encyclopedia of Ocean Engineering*. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-6946-8\\_214](https://doi.org/10.1007/978-981-10-6946-8_214)

- Lince Salazar, L. A. (2021). Capacidad de almacenamiento de agua en suelos cultivados en café y otras propiedades edáficas relacionadas. *Revista Cenicafé*, 72(1): e72101. <https://doi.org/10.38141/10778/72101>
- López G., A. D. R., Palma G., B., Hernández R., M. A., Ojeda M., M. E., Ángeles P., A., Ruiz N., J. A., y García M., M. J. (2007). Caracterización Físicoquímica de los Suelos Predominantes en el Estado de Tabasco. *Conciencia Tecnológica*, (34): 45-46. [fecha de Consulta 6 de Junio de 2023]. ISSN: 1405-5597. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94403412>
- Macias L., A. M., Carvajal R., D. D., Cobo L., D. A., Fienco S., B. E., Peralta D., J. A. y Zambrano A., J. M. (2018). *Mecánica de suelo*. Editorial Área de Innovación y Desarrollo. <http://dx.doi.org/10.17993/IngyTec.2018.33>
- Manna, L.L., Tarabini, M., Gomez, F.A., Noli, P.A., Vogel, B., & Buduba, C.G. (2018). Estimación de la capacidad de retención de agua de suelos volcánicos en función de variables de fácil determinación a campo. *Ciencia del suelo*, 36(1): 23-29. [http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1850-20672018000100003&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672018000100003&lng=es&tlng=es).
- Marín Herrera, N. E. (2021). Efectos de láminas de riego en el rendimiento del pasto buffer (*Cenchrus ciliaris L.*) en río verde, provincia de Santa Elena. Tesis de Licenciatura Universidad Estatal Península de Santa Elena. <https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/6371/1/UPSE-TIA-2021-0093.pdf>
- Márquez, K. (2021). Caracterización de la textura de suelo en la subcuenca del río Zaratí para la evaluación del sistema de agua subterránea. Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología – APANAC, p. 271-277. <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/apanac/article/view/3203>
- Martin, E. C. (2017). Métodos para Medir la Humedad del Suelo para la Programación del Riego ¿Cuándo?. College of Agriculture, University of Arizona (Tucson, AZ). <https://repository.arizona.edu/handle/10150/625275>
- Mauricio L., J. J. (2022). Relación de la textura de los suelos agrícolas de la UNALM con los parámetros hídricos utilizando la olla de Richards. [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Agraria]. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/5639>
- Medina M., J., Volke-Haller, V., González-Ríos, J., Galvis-Spcinola, A., Santiago-Cruz, M., y Cortés-Flores, J. (2006). Cambios en las propiedades físicas del suelo a través del tiempo

- en los sistemas de maíz bajo temporamEl y mango bajo riego en luvisoles del estado de Campeche. *Universidad y Ciencia*, 22(2):175-189. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=15422208>
- Melo S., D. V. y Contreras M., L. M. (2022). ¿Cómo afecta la escasez de agua a la producción de tus alimentos y qué estrategias agrícolas se han implementado para reducir su impacto?. *Digital Ciencia* 15(1): 20-28. <https://revistas.uaq.mx/index.php/ciencia/article/download/629/760/2377>
- Mena, C., Ormazábal, Y., Llanos, J. L., y Díaz, J. (2007). Desarrollo de un Sistema de Información Geográfica para Mejorar la Gestión del Agua de Riego del Embalse Convento Viejo, Chile. *Agricultura Técnica*, 67(1): 49-59. <https://dx.doi.org/10.4067/S0365-28072007000100006>
- Montico, S. (2021). El uso del suelo: cuando un recurso natural se trnasforma en recurso ambiental. *Anales de la Academia Nacional de Agronomía y Veterinaria*, 72: 121-130. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/129366>
- Núñez-Ramírez, F., Escobosa-García, I., Cárdenas-Salazar, V., Santillano-Cázares, J., Ruelas-Islas, J., Preciado-Rangel, P., & Díaz-Ramírez, J.B. (2020). Tensión de humedad del suelo, crecimiento, eficiencia en el uso del agua y rendimiento de maíz cultivado en el noroeste de México. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.763>
- Olaya, V. (2020). *Sistemas de Información Geográfica*. Víctor Olaya. <https://volaya.github.io/libro-sig/>
- Palma López, D. J. (2017). Calidad de agua para riego en dos zonas de Tabasco, México, con potencial para cultivar palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq). *AGROProductividad*, 10(12): 64-71. <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/39>
- Palma López, D.J., Cisneros, D. J., Moreno, C.E. y Rincón, R.A. (2007). Suelos de Tabasco: su uso y manejo sustentable. Colegio de Postgraduados-Isprotab-Fundación Produce Tabasco. Villahermosa, Tabasco, México. [https://www.researchgate.net/profile/David-Palma7/publication/293958380\\_Suelos\\_de\\_Tabasco\\_Su\\_Uso\\_y\\_Manejo\\_Sustentable/links/56bcfac008\\_ae6cc737c6bdb3/Suelos-de-Tabasco-Su-Uso-y-Manejo-Sustentable.pdf](https://www.researchgate.net/profile/David-Palma7/publication/293958380_Suelos_de_Tabasco_Su_Uso_y_Manejo_Sustentable/links/56bcfac008_ae6cc737c6bdb3/Suelos-de-Tabasco-Su-Uso-y-Manejo-Sustentable.pdf)
- Pauta R., R., Mayorga A., D., y Castro M., E. (2019). Uso de sistemas de información geográfica SIG para la elaboración de planos de fincas agrícolas. *Opuntia Brava*, 11(1): 217-223.

- Recuperado a partir de <https://opuntiabrava.ult.edu.cu/index.php/opuntiabrava/article/view/714>
- Pellegrini, A. E. (2020). Muestreo y análisis de suelo en S. B. Martínez, A. V. Carbone y M. Garbi (Ed.), *Producción Hortícola Periurbana: Aspectos técnicos y laborales*. pp. 26-44). Edulp Editorial de la UNLP. [http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/120969/Documento\\_completo.pdf?sequence=1#page=43](http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/120969/Documento_completo.pdf?sequence=1#page=43)
- Prieto G., M., López de F. E., M., Gómez M., M. A., Macías G., Z. y Gálvez E., R. (2021). Boletín de la Asociación Española de Entomología, 45 (3): 237-249. <https://www.entomologica.es/publicaciones-boletin/art1896>
- Principi, N. (2019). Geografía y sistemas de información geográfica. Sus aportes a los estudios de riegos. *Geografía y Sistemas de Información Geográfica (GEOSIG)*, 11(13): 1-3. [https://www.researchgate.net/profile/Noelia-Principi/publication/335124988\\_Geografia\\_y\\_Sistemas\\_de\\_Informacion\\_Geografica\\_Sus\\_aportes\\_a\\_los\\_estudios\\_de\\_riegos/links/5d515c5da6fdcc370a8f10a5/Geografia-y-Sistemas-de-Informacion-Geografica-Sus-aportes-a-los-estudios-de-riegos.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Noelia-Principi/publication/335124988_Geografia_y_Sistemas_de_Informacion_Geografica_Sus_aportes_a_los_estudios_de_riegos/links/5d515c5da6fdcc370a8f10a5/Geografia-y-Sistemas-de-Informacion-Geografica-Sus-aportes-a-los-estudios-de-riegos.pdf)
- Rabanaque, I. (2021). Variabilidad espacial de la salud mental en aragón y análisis de su asociación con el nivel socioeconómico. [Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=302262>
- Rambauth I., G. E. (2022). Agricultura de Precisión: La integración de las TIC en la producción Agrícola. *Computer and Electronic Sciences: Theory and Applications*, 3(1): 34–38. <https://doi.org/10.17981/cesta.03.01.2022.04>
- Ramos C., C. M., Estrada Á., J., Delgado M., G., Pérez E., E. R. y Domínguez A., D. (2019). Evaluación de variables involucradas en riego superficial para incrementar la eficiencia del uso del agua en la Región Lagunera, Coahuila de Zaragoza, México. *Acta Agrícola y Pecuaria*, 5: 24-31. <https://doi.org/10.30973/aap/2019.5.0051004>
- Reichert, J. M., Albuquerque, J. A., Kaiser, D. R., Reinert, D. J., Urach, F. L., & Carlesso, R.. (2009). Estimation of water retention and availability in soils of Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira De Ciência Do Solo*, 33(6): 1547–1560. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000600004>

- Reza, S., Nayak, D., Chattopadhyay, T., Mukhopadhyay, S., Singh, S., y Srinivasan, R. (2016). Spatial distribution of soil physical properties of alluvial soils: a geostatistical approach. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 62, 972 - 981. <https://doi.org/10.1080/03650340.2015.1107678>.
- Ribón, C., Martha, A., Salgado, G., Palma L., D. J., y Lagunes E., L. del C. (2003). Propiedades químicas y físicas de un vertisol cultivado con caña de azúcar. *Interciencia*, 28(3), 154-159. Recuperado de: [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0378-18442003000300007&lng=es&tlng=es](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442003000300007&lng=es&tlng=es).
- Robinson, G. W. (1960). Los suelos, su origen constitución y clasificación Introducción a la Edafología. Traducido por Amoros, J. L. Ediciones omega. Barcelona.
- Rodríguez, A. (2009). *Estimación de la capacidad de campo y punto de marchitez permanente por regresión lineal múltiple con la composición granulométrica del suelo en el Valle Chicama, La libertad* [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional de Trujillo]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Trujillo <http://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/9873>
- Roel, Á. y Terra, J. (2006). Muestreo de suelos y factores limitantes del rendimiento. En R. Bongiovanni, E. Chartuni, S. Best y Á. Roel (Eds.), *Agricultura de precisión: Integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable*. pp. 65-80. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. <http://repositorio.iica.int/handle/11324/7408>
- Roldán C., J., Díaz J., M., Pérez A., R. y Moreno P., M. F. (2010). "Mejora de la gestión del agua de riego mediante el uso de indicadores de riego: ". En: *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 42, (1): 107-124. <https://bdigital.uncu.edu.ar/3509>.
- Salamanca J., A.; Lince S., L. A.; Alzate S., N. A. (2018). Variabilidad espacial de la densidad aparente del suelo a nivel de lote en café. *Revista Cenicafe* 69(2):47-59. <https://www.cenicafe.org/es/publications/Revista69%282%29-Web1.pdf#page=46>
- Salazar C., C., González V., J. P., Corrales V., D., Lacayo V., J., Carrillo M., K., y Montero G., H. (2020). Comparación de dos métodos para la determinación de la densidad aparente del suelo. *Alcances Tecnológicos*, 13(1): 5 - 12. <https://doi.org/10.35486/at.v13i1.164>
- Salgado G., S., Palma L., D. J., Zavala C., J., Ortiz-García, C. F., Lagunes E., L. C., Ortiz Ceballos, A. I., Cordova Sanchez, S. y Salgado Velázquez, S. (2017). Los suelos ácidos

- de la sabana de Huimanguillo, Tabasco, Tabasco, México. *Agro Productividad*, 10 (12): 16-21. <https://revistaagroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/31>
- Sandoval G., C., Cantú S., I., González R., H., Yáñez D., M., Marmolejo M., J. G. y Gómez M., M. (2021). Efecto de diferentes usos del suelo en las propiedades físicas e hidrológicas de un Luvisol en Oaxaca. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 12(68): 151-177. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i68.982>
- Santana Castañeda, G. (2020). Variabilidad espacial de la mortalidad general y características económicas en el Estado de México. *Semestre Económico*, 23(54): 279-302. <https://doi.org/10.22395/seec.v23n54a14>
- Santos P., J. M. (2020). *Sistemas de Información Geográfica*. Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT] (2024). Mapa con los diferentes grupos de suelos por textura que existen en el territorio mexicano. Subsistema de Información sobre el Ordenamiento Ecológico (SIORE). [https://gisviewer.semarnat.gob.mx/aplicaciones/uga\\_oe2/](https://gisviewer.semarnat.gob.mx/aplicaciones/uga_oe2/)
- Servicio Meteorológico Nacional (2023). *Proyecto de bases de datos climatológicos*. <https://siaps://smn.conagua.gob.mx/tools/RECURSOS/Mensuales/tab/00027024.TXT>
- Shan L.I, Qi-quan L.I, Chang-quan WANG, Bing LI, Xue-song GAO, Yi-ding LI y De-yong WU. (2019). Spatial variability of soil bulk density and its controlling factors in an agricultural intensive area of Chengdu Plain, Southwest China. *Journal of Integrative Agriculture*, 18, 290-300. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095311918619306>
- Silva J., R. C. (2020). Capacidad de retención de agua disponible en suelos agrícolas de acuerdo a la textura y al contenido de materia orgánica, transecto Huaura-Mazo. [Tesis de licenciatura, Universidad Católica Sedes Sapientiae]. <https://repositorio.ucss.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14095/837/Tesis%20-%20Silva%20Julca%2c%20Ronald%20Christian.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Silva, A., Ponce de L., J., García, F. y Durán, A. (1988). Aspectos metodológicos en la determinación de la capacidad de retener agua de los suelos del Uruguay. *Boletín de Investigación UDELAR FA*, 10: 1-20. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/31373>

- Tarjuelo M., J. M. (1991). El riego por aspersión: diseño y funcionamiento. Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha.
- United States Department of Agriculture [USDA]. (2008). *Soil Quality Indicators*. <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2023-01/Soil%20Quality-Indicators-Bulk%20Density.pdf>
- Uribe, E. M., Corral, F., Escamilla, J. C. y Cruz, E. (2019). Desarrollo y aplicación de una metodología para la elaboración de mapas de peligro municipales por deslizamientos de terreno mediante Sistemas de Información Geográfica. *Pádi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, (13): 29-34. <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icbi/article/view/3439/6481>
- Valenzuela, I., Perea, G., Amézquita E. (2001). Evaluación del agua gravitacional a través del perfil de un suelo de la altillanura. *CGSpace*. 31(2): 210-214 [http://ciat-library.ciar.org/Articulos\\_ciat/suelos/suelos5.pdf](http://ciat-library.ciar.org/Articulos_ciat/suelos/suelos5.pdf)
- Varela, I. (2022). Impacto del cultivo de la vid en la variabilidad espacial de las propiedades químicas de un suelo de la Denominación de Origen Ribeiro. [Tesis doctoral, Universidade da Coruña]. <http://hdl.handle.net/2183/31281>
- Vargas Diaz, Ruy Edeymar, Galindo Pacheco, Julio Ricardo, & Henao, Ramón Giraldo. (2021). Análisis espacial de propiedades físicas del suelo de la Hoya del río Suárez, Boyacá - Santander (Colombia), utilizando componentes principales. *Investigación Agraria*, 23(1): 8-16. Epub June 00, 2021. <https://doi.org/10.18004/investig.agrar.2021.junio.2301657>
- Varón Ramírez, V., Araujo Carrillo, G., y Santamaría, M. (2022). Colombian soil texture: building a spatial ensemble model. *Earth System Science Data*, 10, 4719-4741. <https://essd.copernicus.org/articles/14/4719/2022/>
- Vera M., L. R., Hernández J., A., Cedeño S., Á. F., Guzmán C., Á. M., Ormaza C., K. P. y López A., G. A. (2019). Principales suelos y particularidades de su formación del sistema Carrizal-Chone, Manabí, Ecuador. *Cultivos Tropicales*, 40(2). <https://www.redalyc.org/journal/1932/193262825006/html/>
- Villareal Barrera, A. M. (2021). Importancia del manejo de suelos en la sostenibilidad agrícola. *Revista Semilla del Este*, 2(1): 28-36. <https://repositoriosiidca.csuca.org/Record/RepoUP4922>

- Yousefi, R. M. y Razdari, A. M. (2015). Application of GIS in Precision Agriculture (a Review). International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research 3(1): 7-9. <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=6375ca95814b0b800189e11cc923b1cc8e6a057b>
- Zavala, J., Palma, D., Cabrera, C., Lopez, A. & Tórres, E. (2011). Degradación y Conservación de Suelos en la Cuenca del Río Grijalva, Tabasco. [https://www.researchgate.net/publication/293944208\\_Degradacion\\_y\\_Conservacion\\_de\\_Suelos\\_en\\_la\\_Cuenca\\_del\\_Rio\\_Grijalva\\_Tabasco](https://www.researchgate.net/publication/293944208_Degradacion_y_Conservacion_de_Suelos_en_la_Cuenca_del_Rio_Grijalva_Tabasco)
- Zotarelli L., Dukes M., y Morgan K. (2019). Interpretación del contenido de la humedad del suelo para determinar capacidad de campo y evitar riego excesivo en suelos arenosos utilizando sensores de humedad. IFAS Extension University of Florida. <https://edis.ifas.ufl.edu/publication/AE496>

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.

## XI. Anexos

Figura 1A

Mapa de distribución de densidad aparente

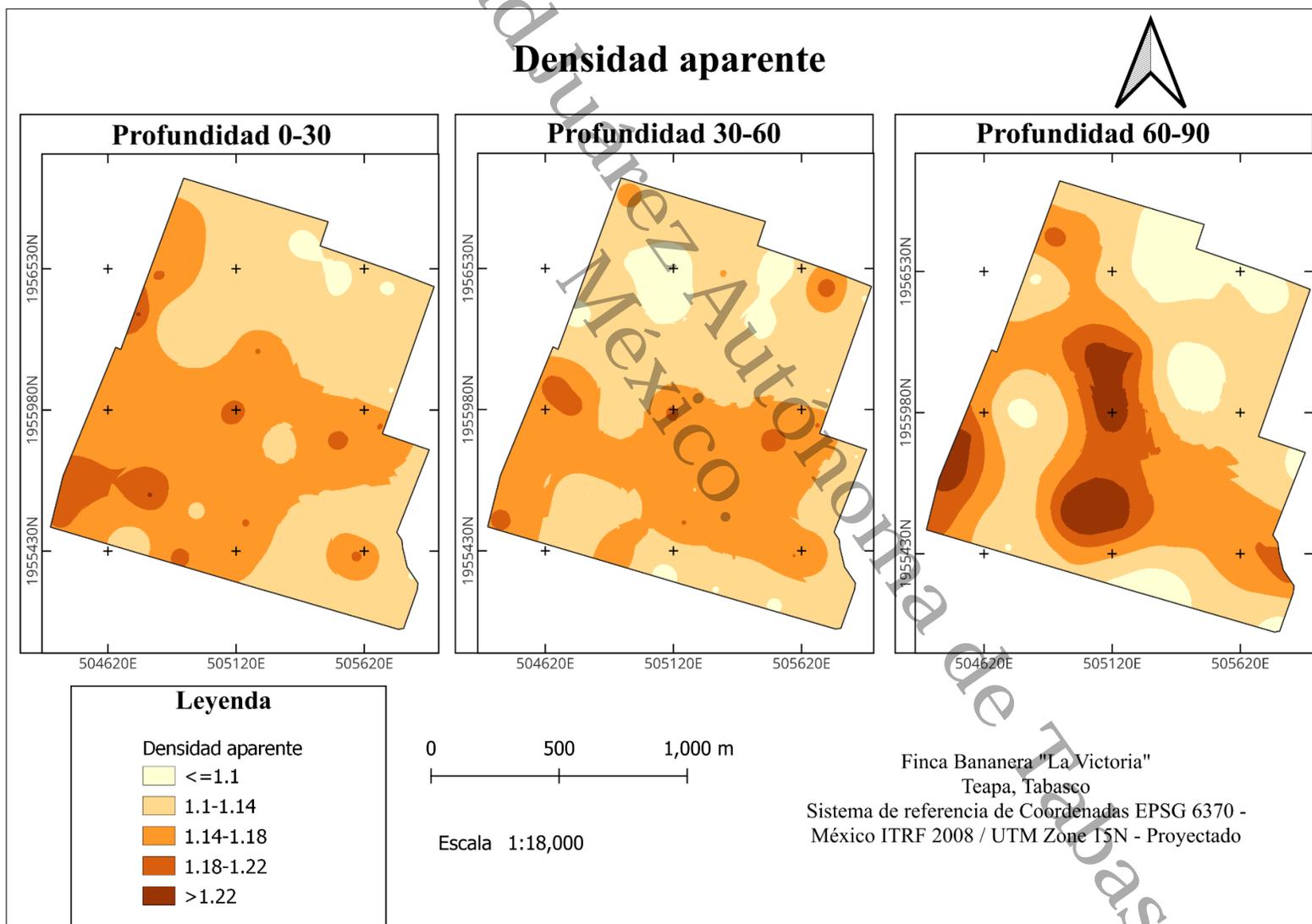


Figura 2A

Mapa de distribución de la textura del suelo.

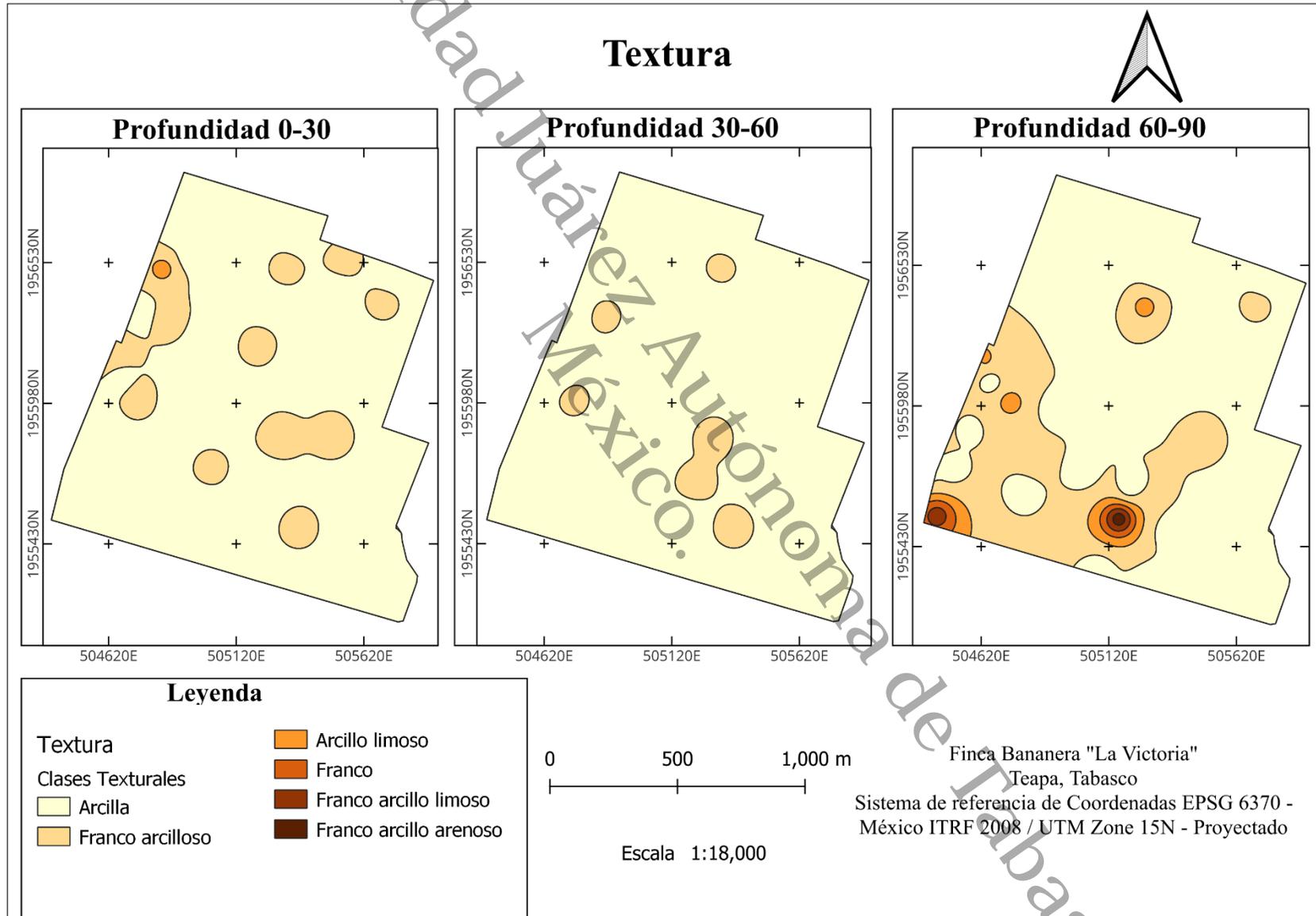


Figura 3A

Mapa de distribución de partículas de arena

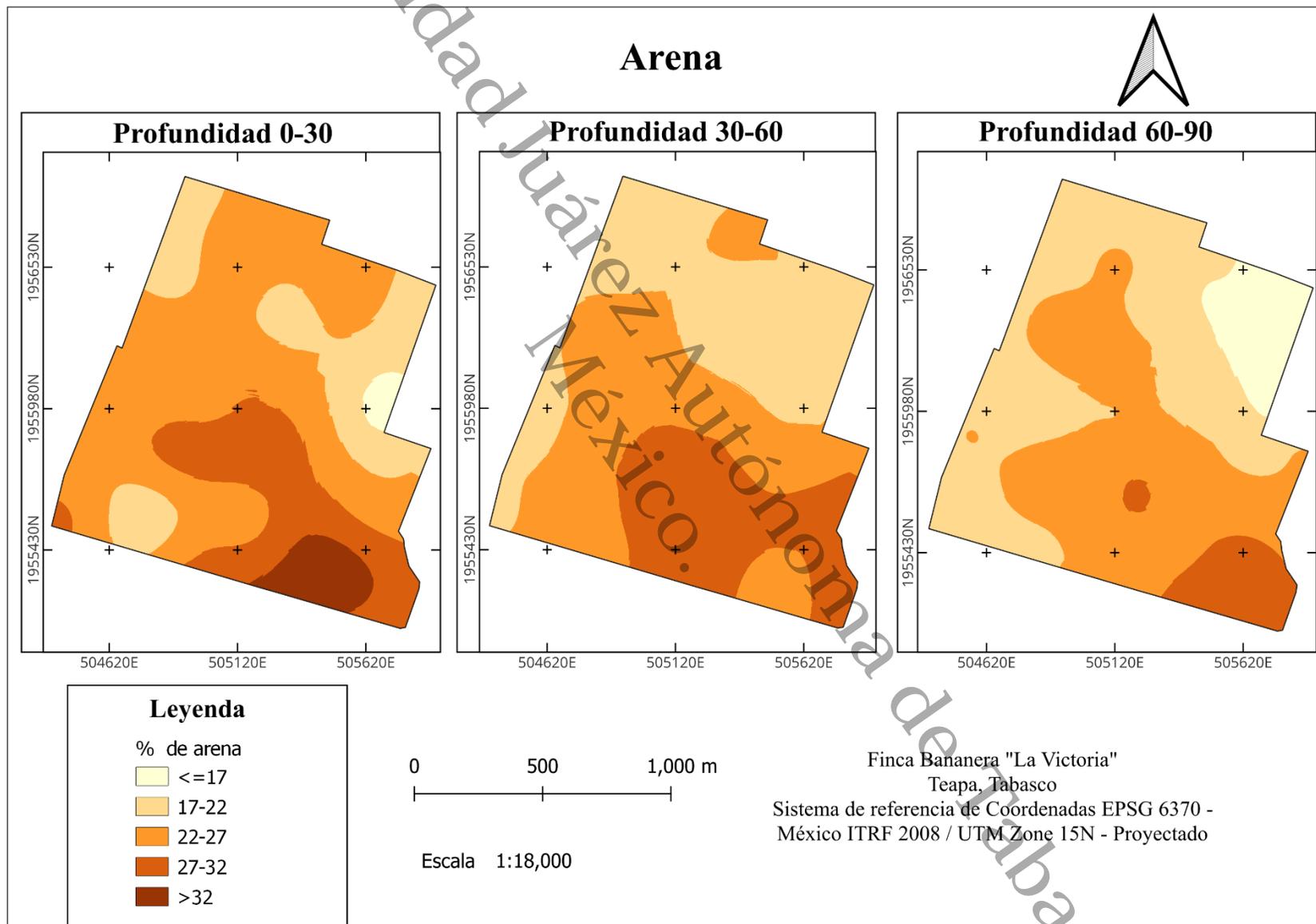


Figura 4A

Mapa de distribución de partículas de limo

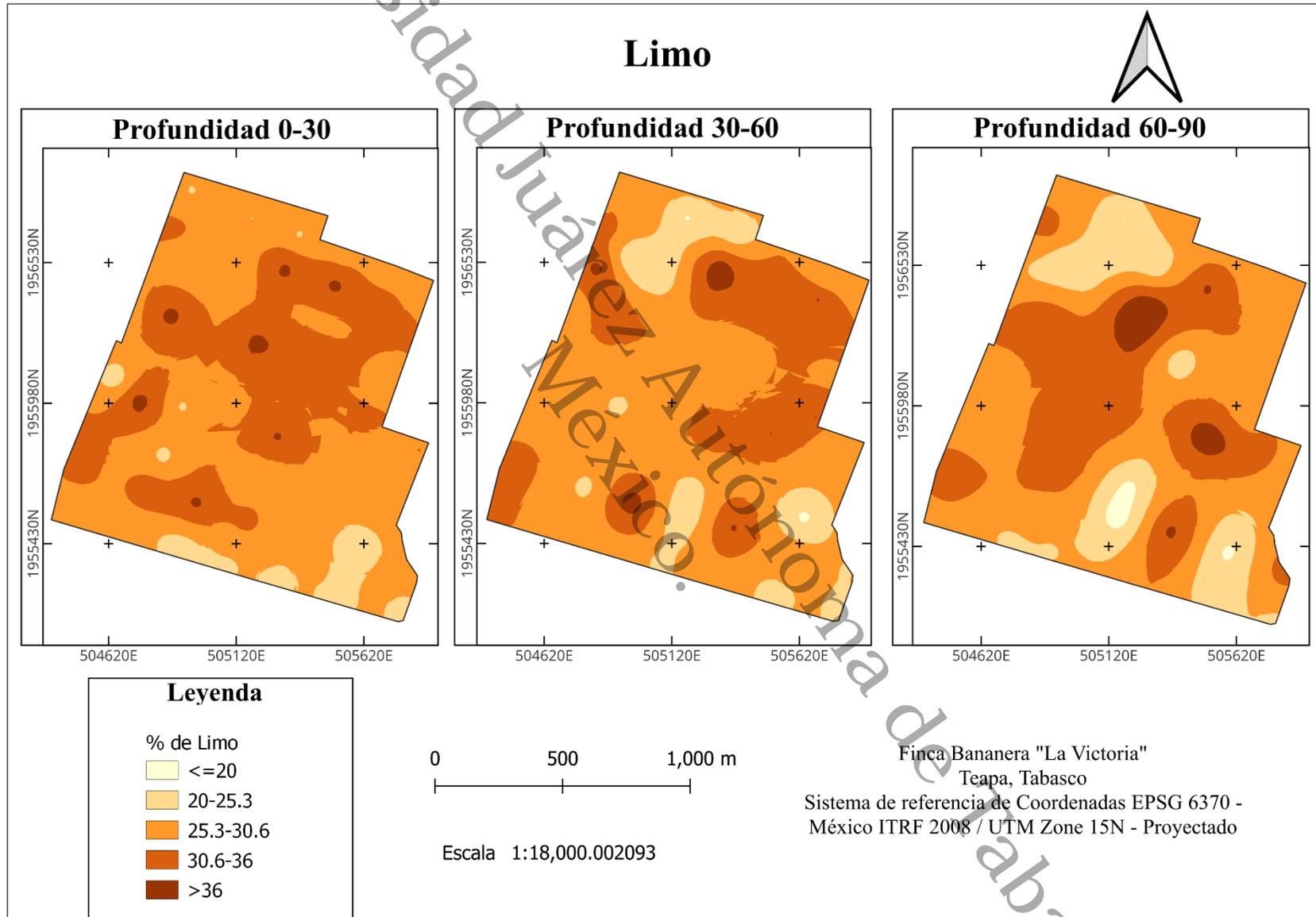


Figura 5A

Mapa de distribución de partículas de arcilla

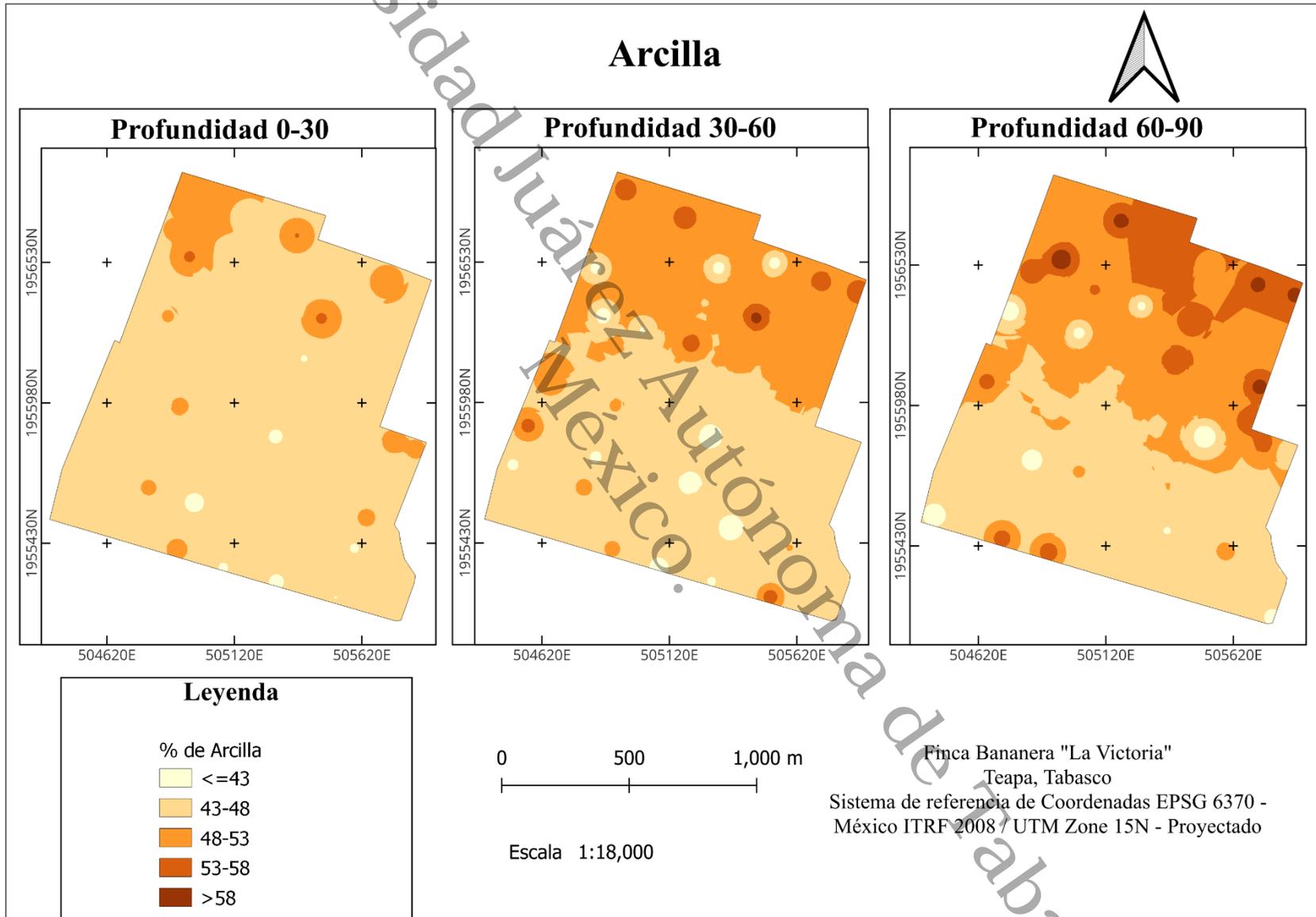


Figura 6A

Mapa de distribución de punto de marchitez permanente

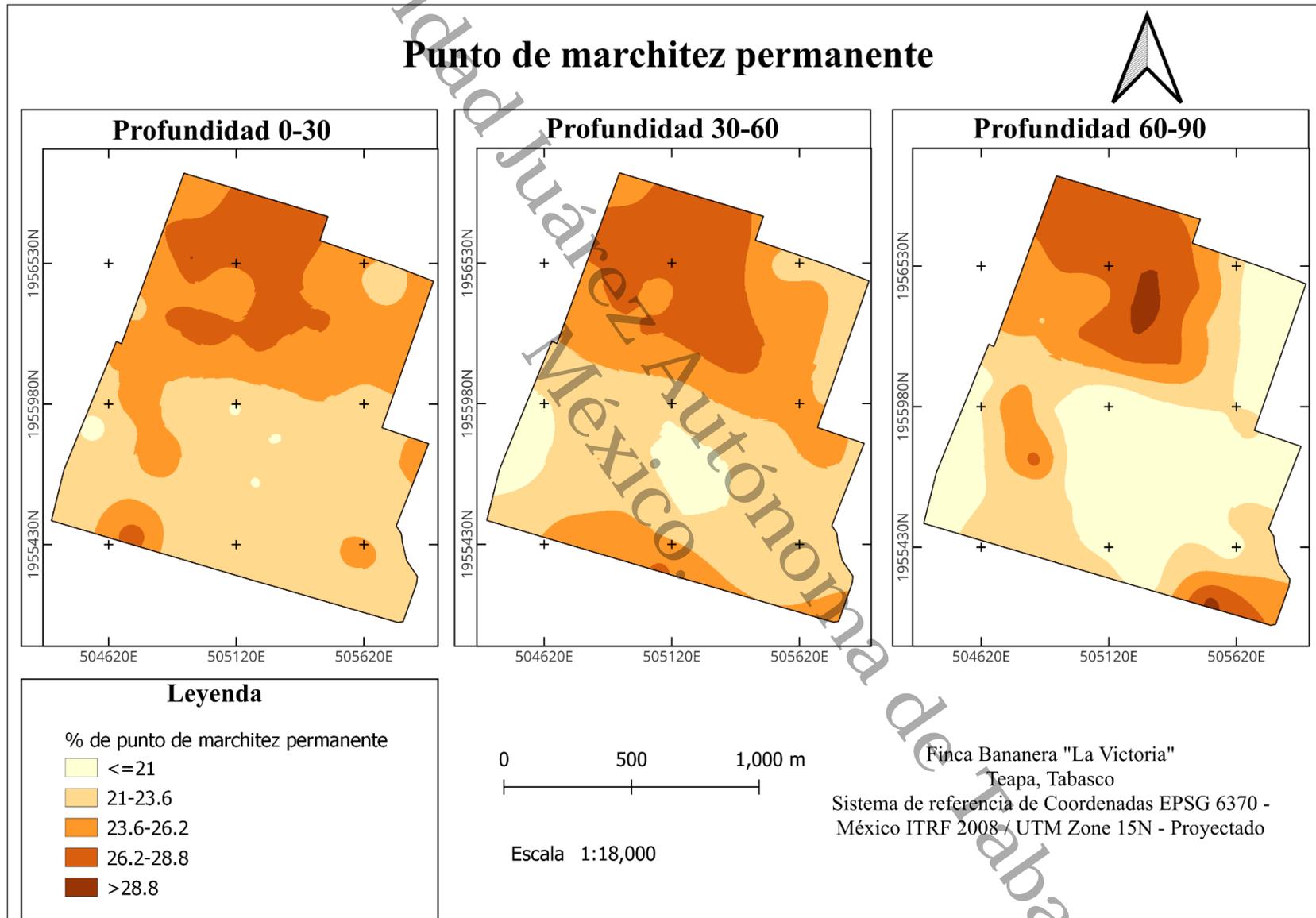


Figura 7A

Mapa de distribución de capacidad de campo

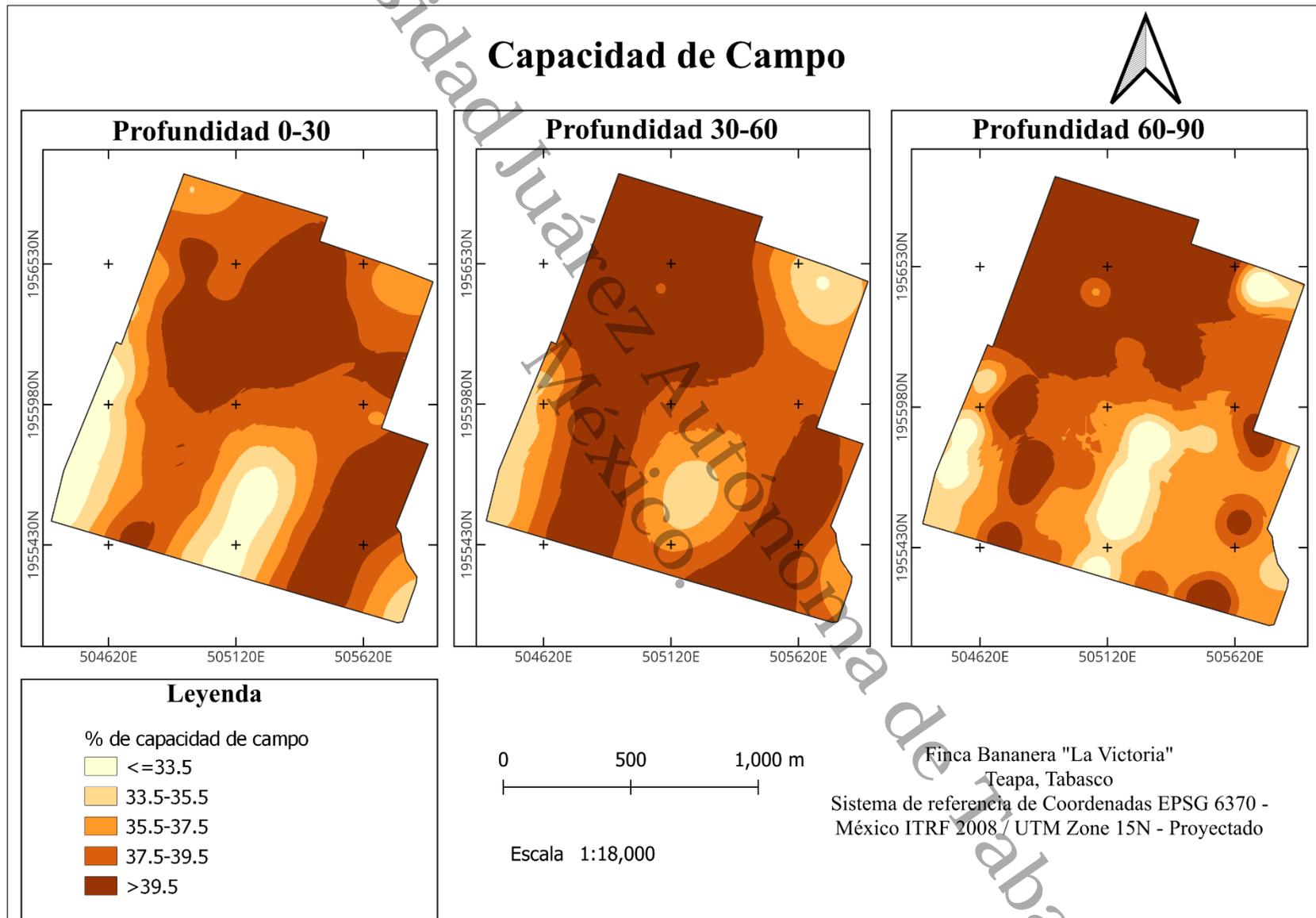


Figura 8A

Mapa de distribución de humedad a saturación

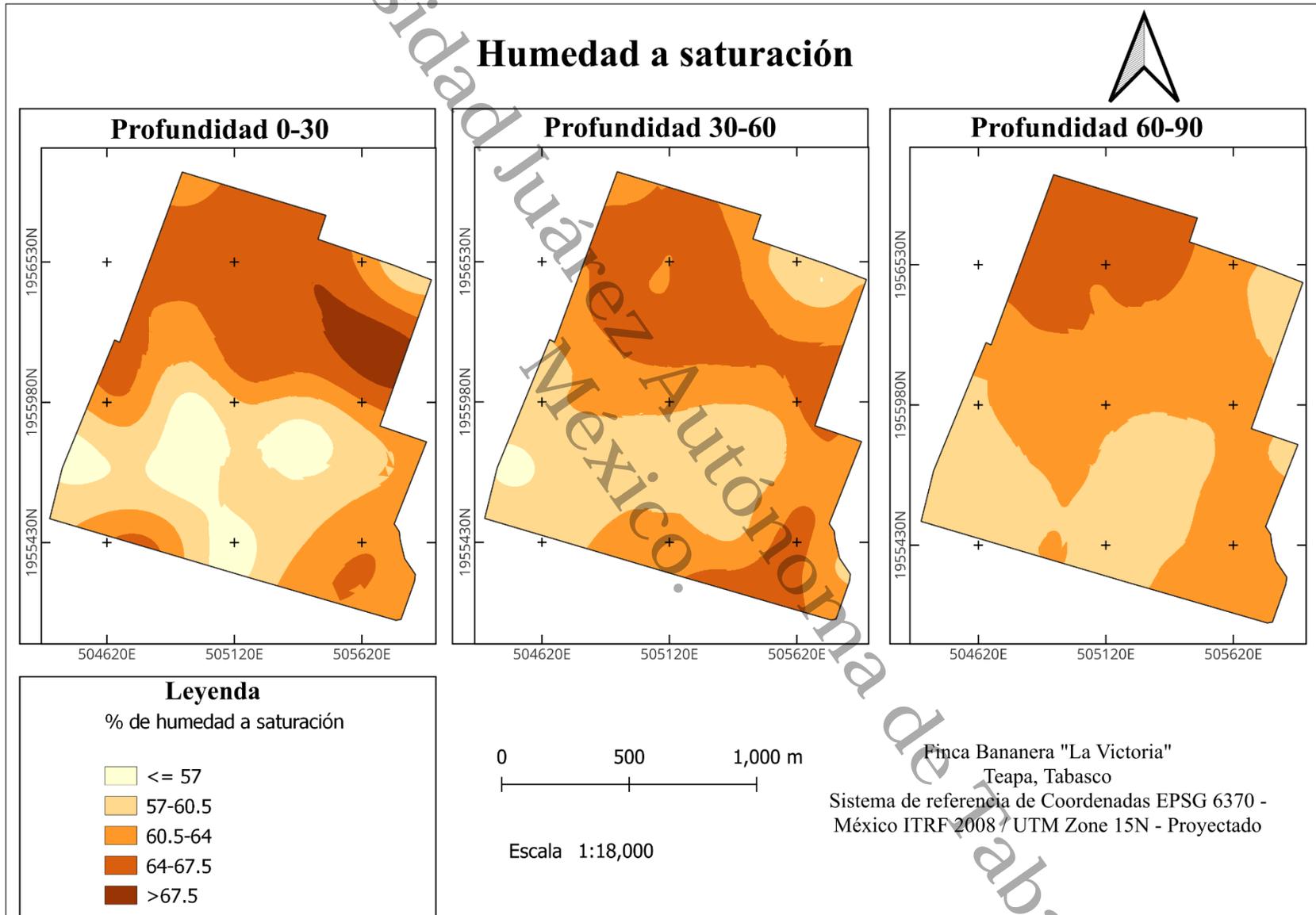


Figura 9A

Mapa de distribución de láminas de punto de marchitez permanente, capacidad de campo y humedad a saturación

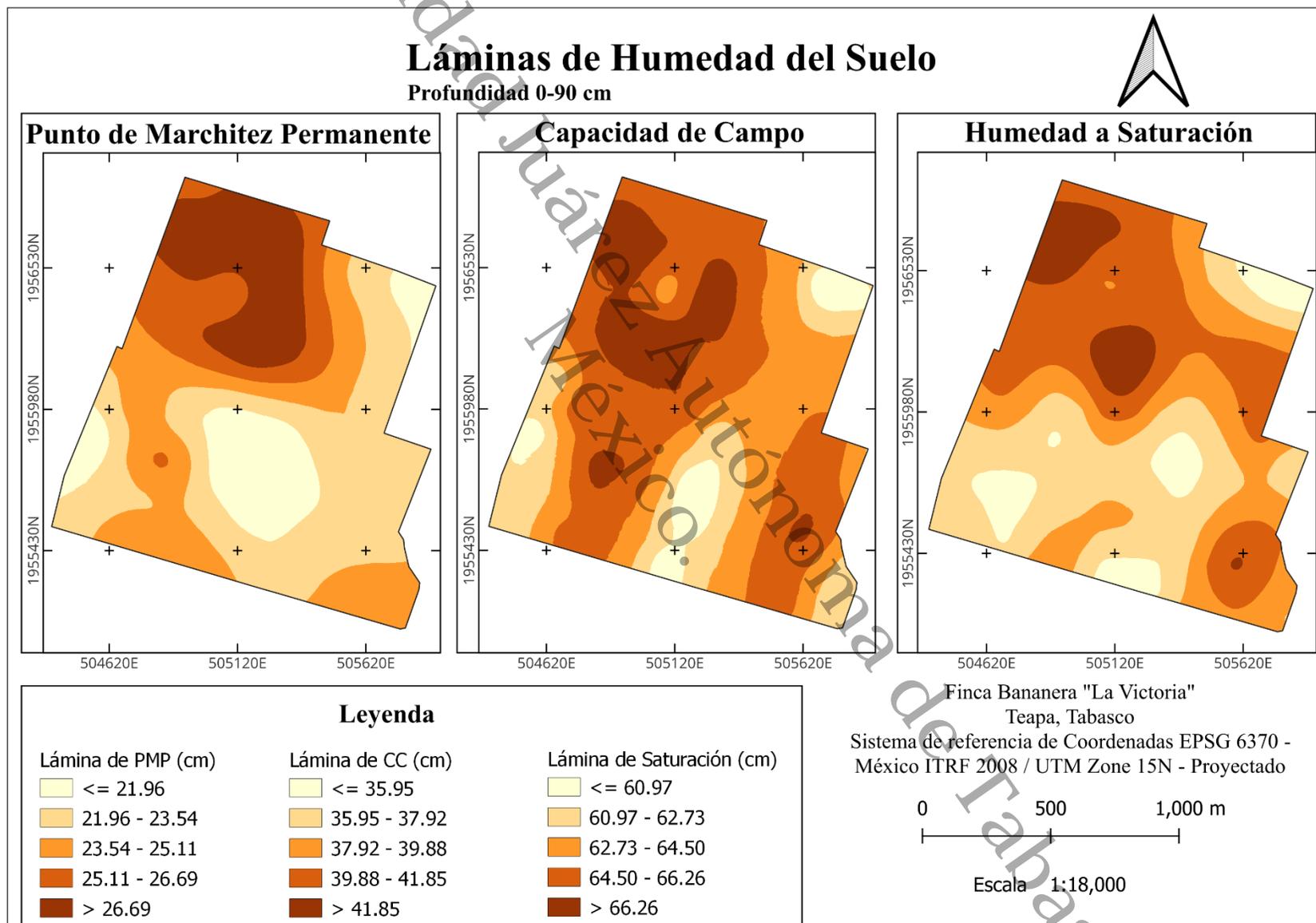


Figura 10A

Mapa de distribución de lámina de reposición

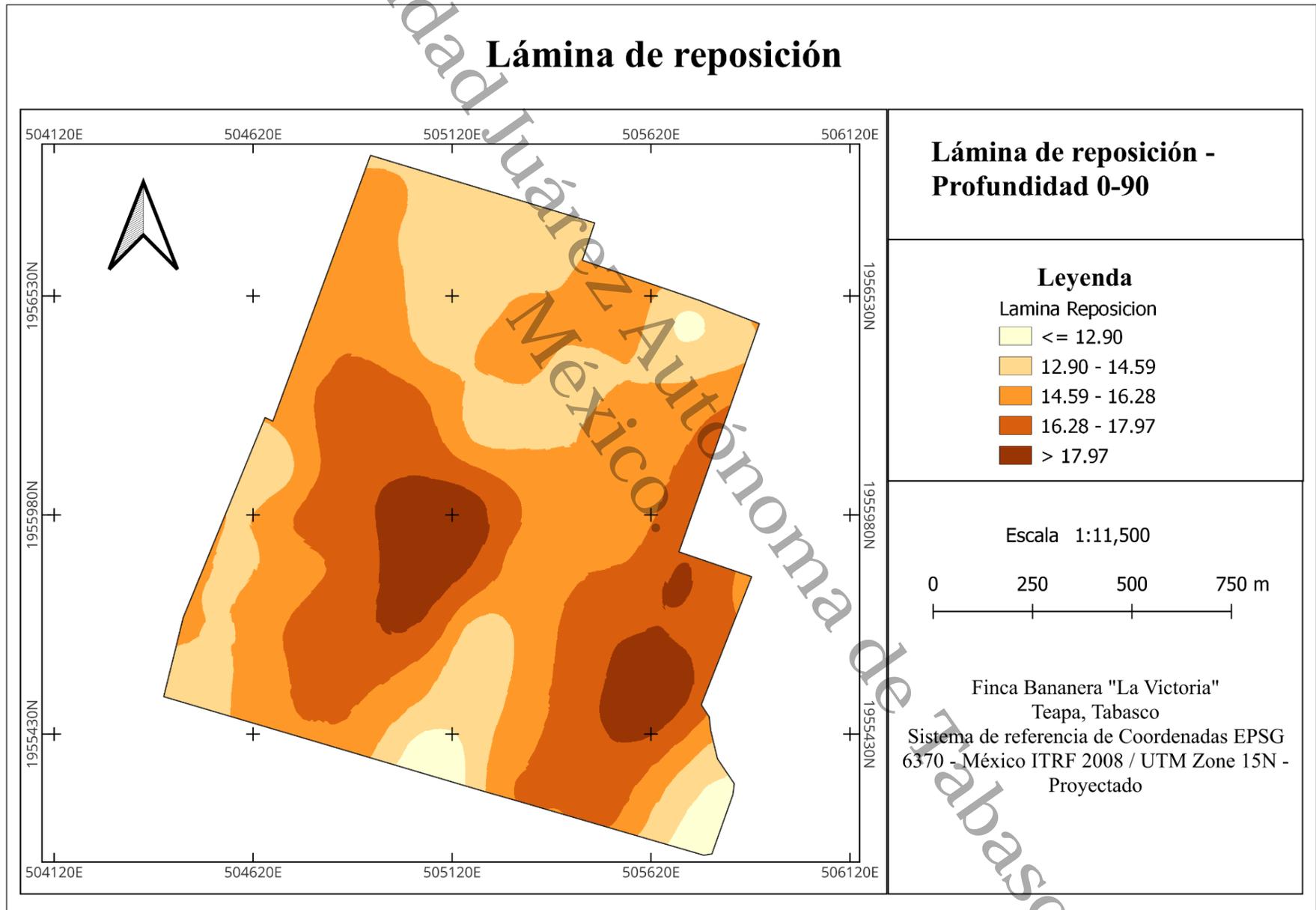


Figura 11A

Mapa de distribución de lámina de punto de marchitez permanente

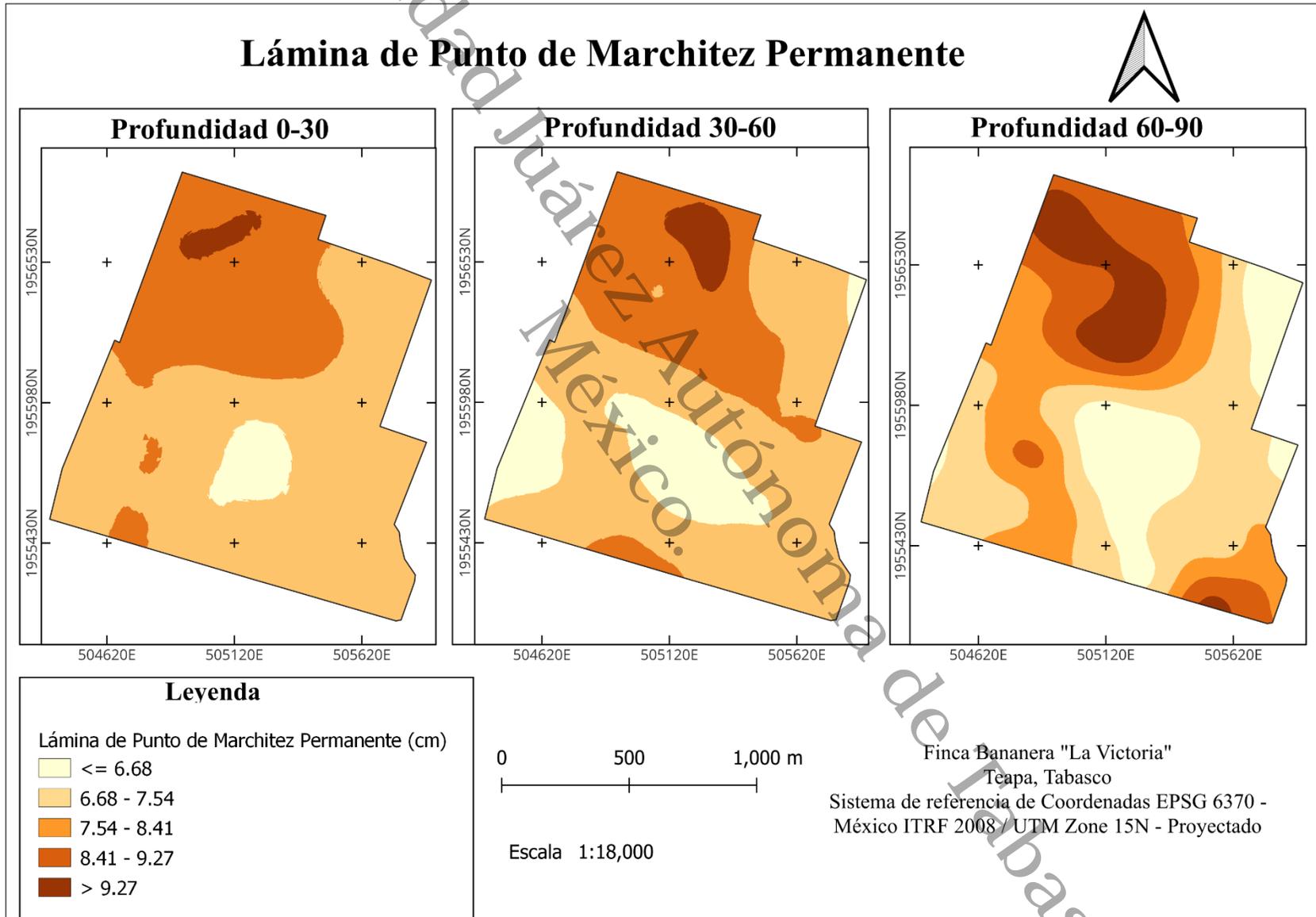


Figura 12A

Mapa de distribución de lámina de capacidad de campo

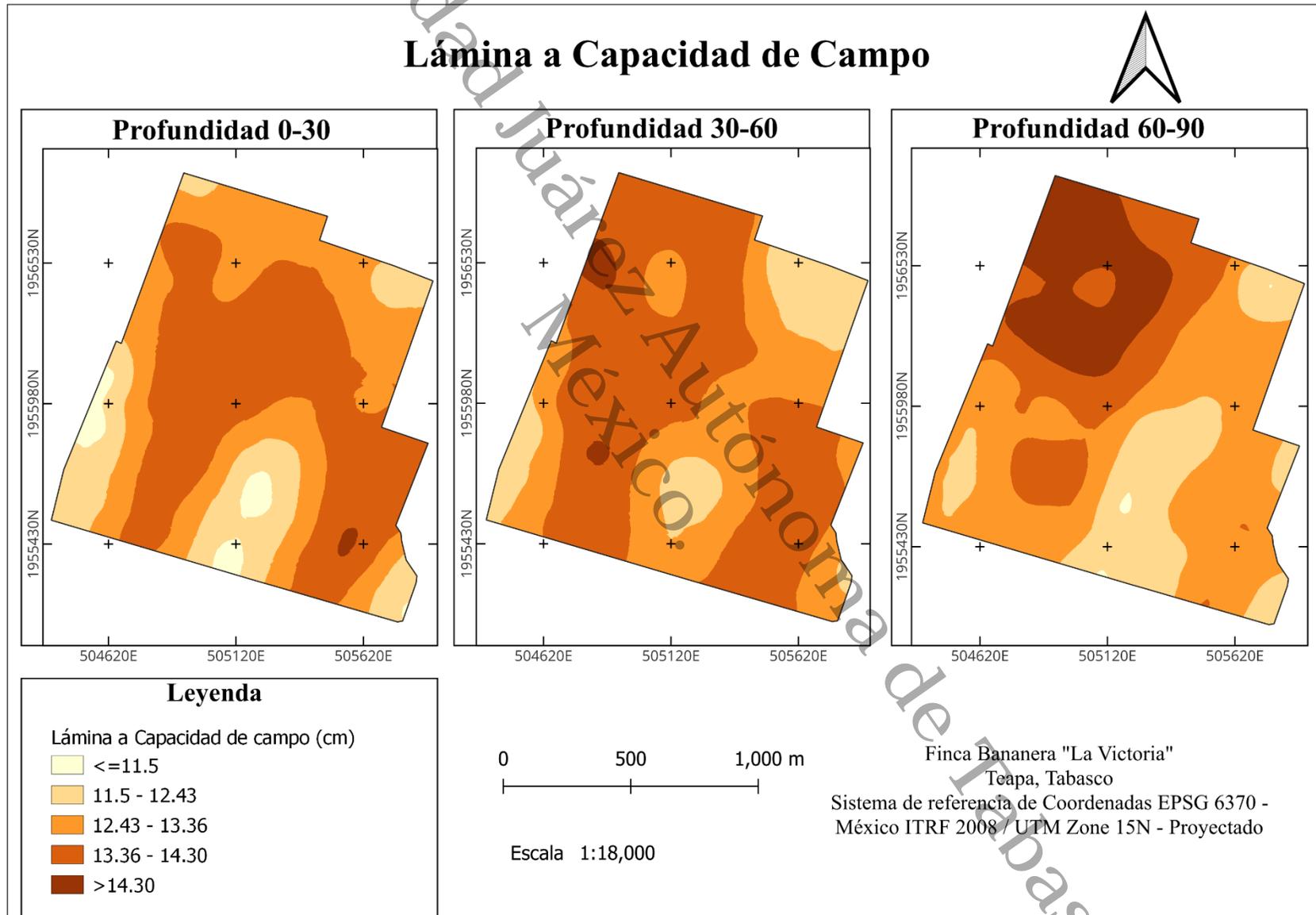


Figura 13A

Mapa de distribución de lámina de humedad a saturación

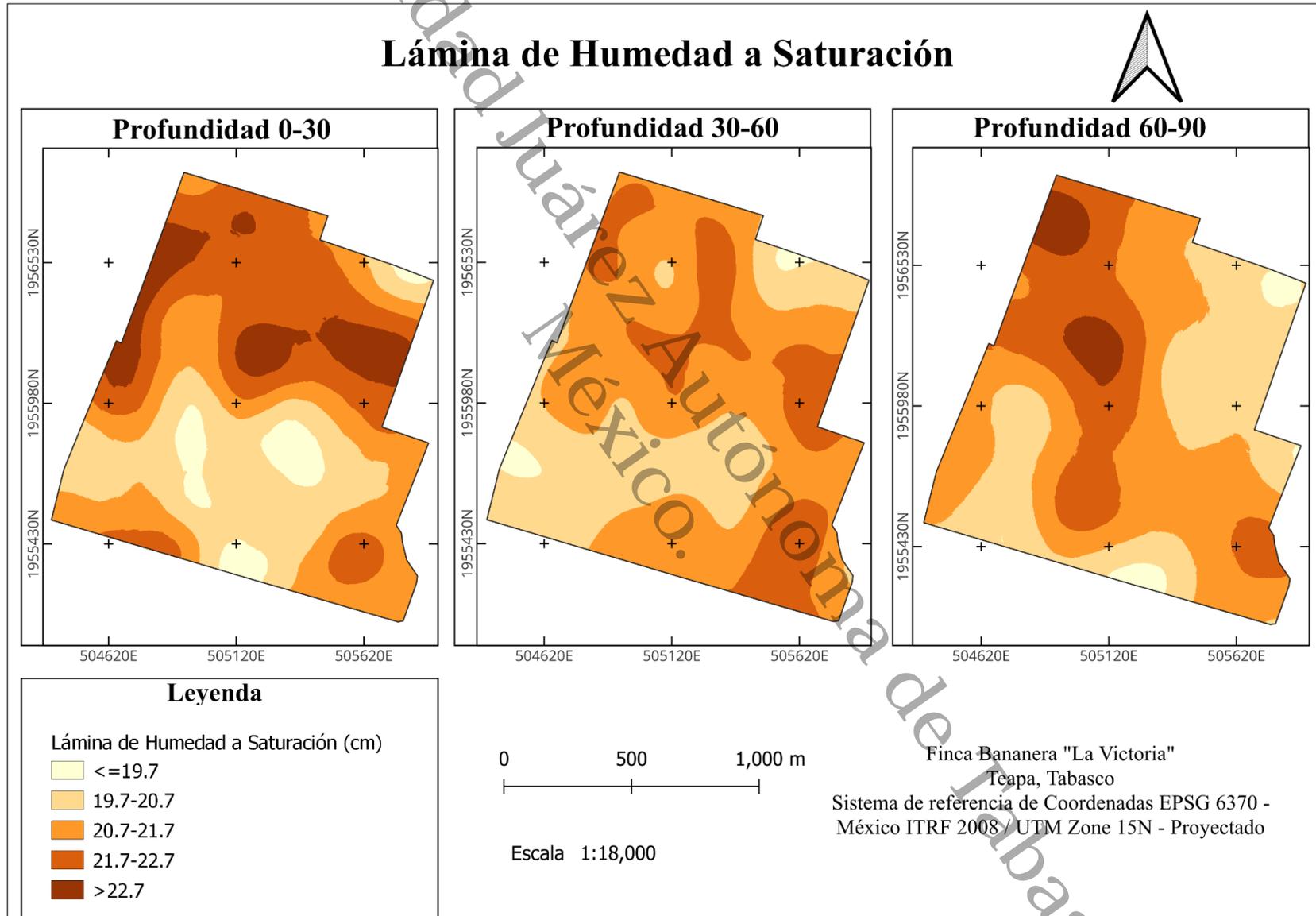
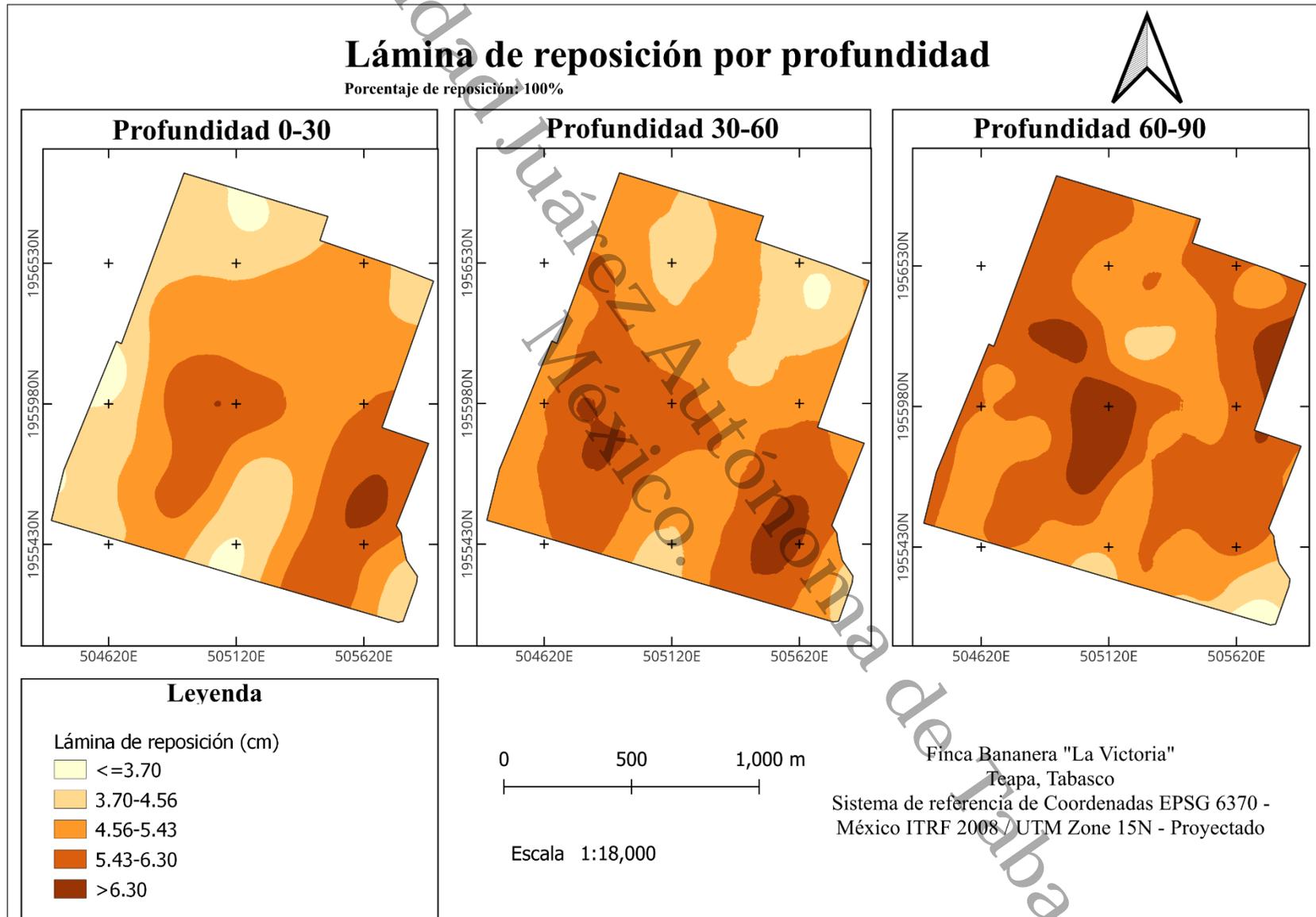


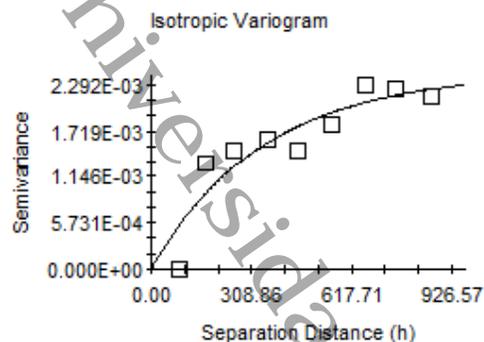
Figura 14A

Mapa de distribución de lámina de reposición (100%) por profundidad



**Figura 15A**

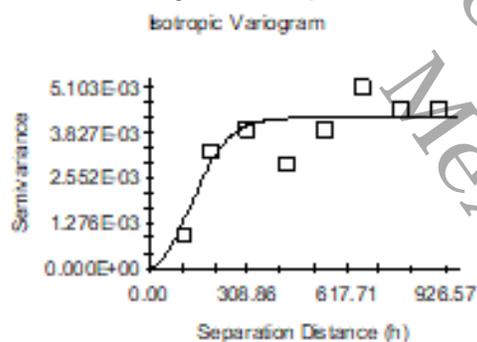
*Semivariograma del parámetro densidad aparente, profundidad 0-30 cm*



Exponential model ( $C_0 = 0.00000$ ;  $C_0 + C = 0.00244$ ;  $A_0 = 346.00$ ;  $r^2 = 0.834$ ;  
RSS =  $6.736E-07$ )

**Figura 16A**

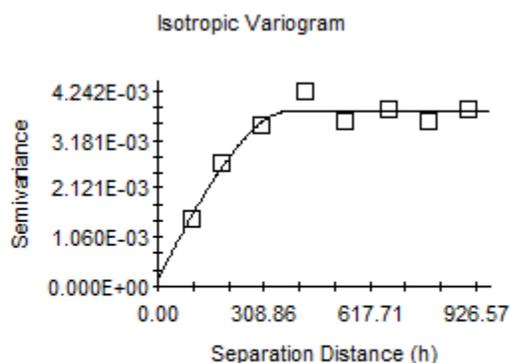
*Semivariograma del parámetro densidad aparente, profundidad 30-60 cm*



Gaussian model ( $C_0 = 0.00001$ ;  $C_0 + C = 0.00421$ ;  $A_0 = 178.00$ ;  $r^2 = 0.759$ ;  
RSS =  $2.896E-08$ )

**Figura 17A**

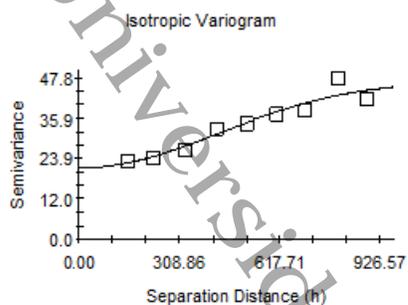
*Semivariograma del parámetro densidad aparente, profundidad 60-90 cm*



Spherical model ( $C_0 = 0.00015$ ;  $C_0 + C = 0.00382$ ;  $A_0 = 388.00$ ;  $r^2 = 0.944$ ;  
RSS =  $3.044E-07$ )

**Figura 18A**

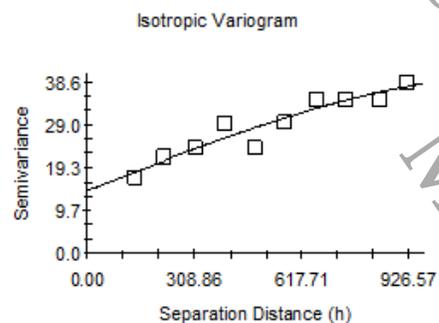
*Semivariograma del parámetro arena, profundidad 0-30 cm*



Gaussian model ( $C_0 = 21.09000$ ;  $C_0 + C = 47.10000$ ;  $A_0 = 600.00$ ;  $r^2 = 0.919$ ;  
RSS = 43.9)

**Figura 19A**

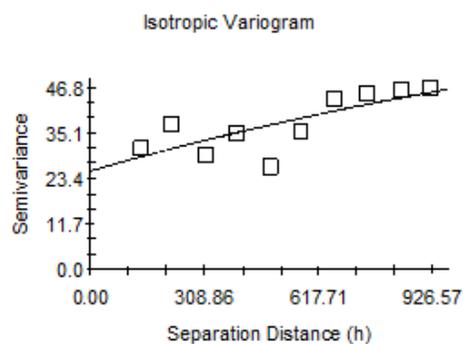
*Semivariograma del parámetro arena, profundidad 30-60 cm*



Spherical model ( $C_0 = 14.18000$ ;  $C_0 + C = 40.71000$ ;  $A_0 = 1299.00$ ;  $r^2 = 0.905$ ;  
RSS = 41.6)

**Figura 20A**

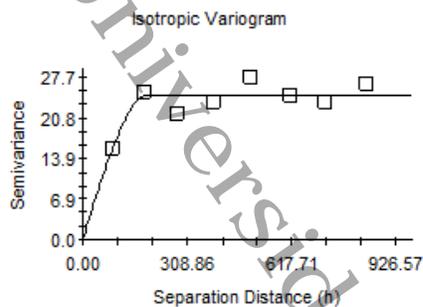
*Semivariograma del parámetro arena, profundidad 60-90 cm*



Exponential model ( $C_0 = 25.20000$ ;  $C_0 + C = 81.40000$ ;  $A_0 = 2044.00$ ;  $r^2 = 0.595$ ;  
RSS = 204.)

**Figura 21A**

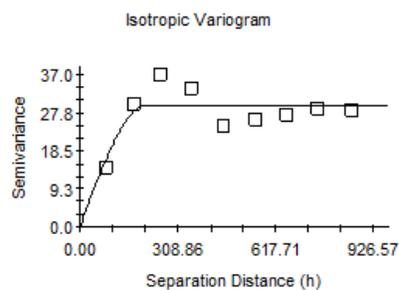
*Semivariograma del parámetro limo, profundidad 0-30 cm*



Spherical model ( $C_0 = 0.01000$ ;  $C_0 + C = 24.65000$ ;  $A_0 = 195.00$ ;  $r_2 = 0.733$ ;  $RSS = 26.0$ )

**Figura 22A**

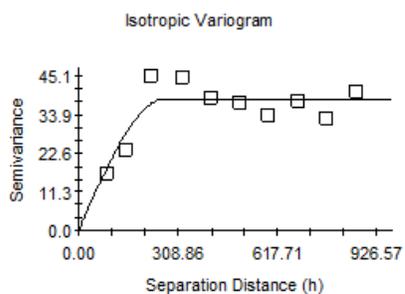
*Semivariograma del parámetro limo, profundidad 30-60 cm*



Spherical model ( $C_0 = 0.01000$ ;  $C_0 + C = 29.58000$ ;  $A_0 = 212.00$ ;  $r_2 = 0.616$ ;  $RSS = 121.$ )

**Figura 23A**

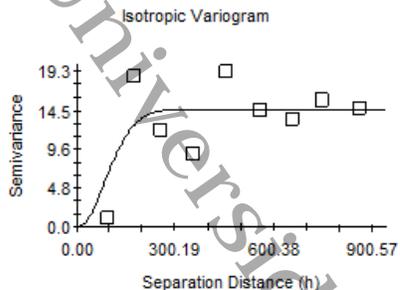
*Semivariograma del parámetro limo, profundidad 60-90 cm*



Spherical model ( $C_0 = 0.10000$ ;  $C_0 + C = 38.43000$ ;  $A_0 = 271.00$ ;  $r_2 = 0.739$ ;  $RSS = 193.$ )

Figura 24A

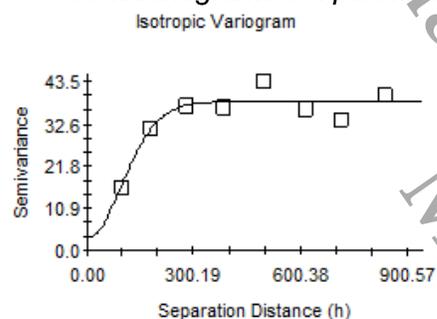
Semivariograma del parámetro arcilla, profundidad 0-30 cm



Gaussian model ( $C_0 = 0.01000$ ;  $C_0 + C = 14.68000$ ;  $A_0 = 125.00$ ;  $r^2 = 0.536$ ;  
RSS = 124.)

Figura 25A

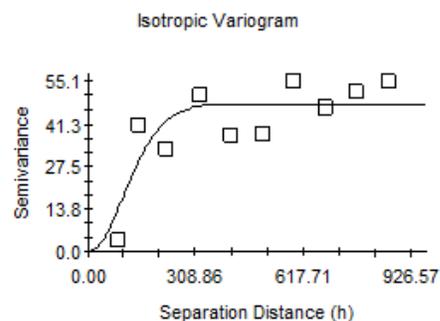
Semivariograma del parámetro arcilla, profundidad 30-60 cm



Gaussian model ( $C_0 = 3.30000$ ;  $C_0 + C = 38.08000$ ;  $A_0 = 141.00$ ;  $r^2 = 0.878$ ;  
RSS = 57.2)

Figura 26A

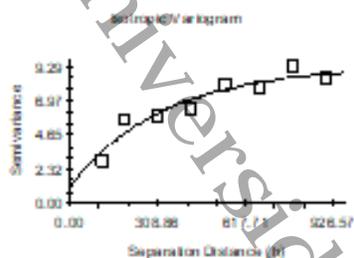
Semivariograma del parámetro arcilla, profundidad 60-90 cm



Gaussian model ( $C_0 = 0.10000$ ;  $C_0 + C = 47.41000$ ;  $A_0 = 150.00$ ;  $r^2 = 0.699$ ;  
RSS = 638.)

**Figura 27A**

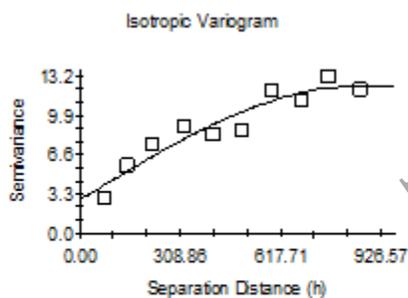
*Semivariograma del parámetro punto de marchitez permanente, profundidad 0-30 cm*



Exponential model ( $C_0 = 1.17000$ ;  $C_0 + C = 9.31300$ ;  $A_0 = 330.00$ ;  $r^2 = 0.908$ ;  $RSS = 2.70$ )

**Figura 28A**

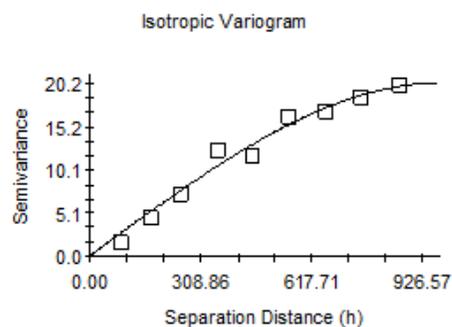
*Semivariograma del parámetro punto de marchitez permanente, profundidad 30-60 cm*



Spherical model ( $C_0 = 2.77000$ ;  $C_0 + C = 12.38000$ ;  $A_0 = 858.00$ ;  $r^2 = 0.900$ ;  $RSS = 9.04$ )

**Figura 29A**

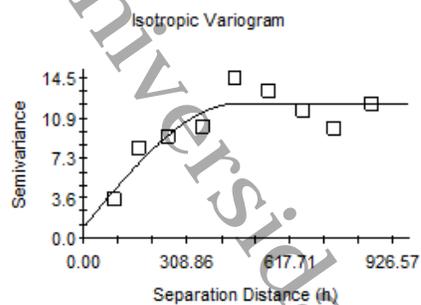
*Semivariograma del parámetro punto de marchitez permanente, profundidad 60-90 cm*



Spherical model ( $C_0 = 0.01000$ ;  $C_0 + C = 20.33000$ ;  $A_0 = 978.00$ ;  $r^2 = 0.976$ ;  $RSS = 8.76$ )

**Figura 30A**

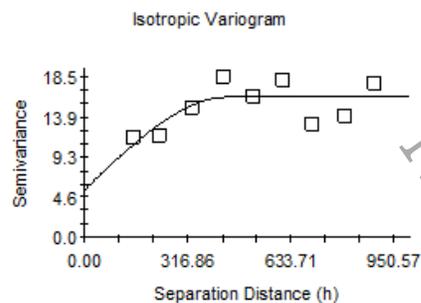
*Semivariograma del parámetro capacidad de campo, profundidad 0-30 cm*



Spherical model ( $C_0 = 0.96000$ ;  $C_0 + C = 12.22000$ ;  $A_0 = 464.00$ ;  $r_2 = 0.806$ ;  $RSS = 16.2$ )

**Figura 31A**

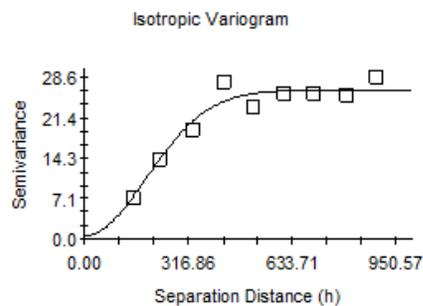
*Semivariograma del parámetro capacidad de campo, profundidad 30-60 cm*



Spherical model ( $C_0 = 5.38000$ ;  $C_0 + C = 16.20000$ ;  $A_0 = 447.00$ ;  $r_2 = 0.500$ ;  $RSS = 29.2$ )

**Figura 32A**

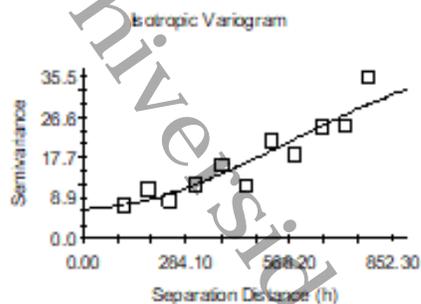
*Semivariograma del parámetro capacidad de campo, profundidad 60-90 cm*



Gaussian model ( $C_0 = 0.54000$ ;  $C_0 + C = 26.32000$ ;  $A_0 = 267.00$ ;  $r_2 = 0.933$ ;  $RSS = 26.8$ )

Figura 33A

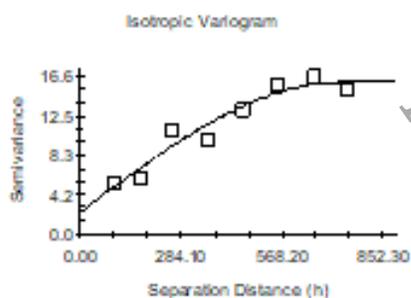
*Semivariograma del parámetro humedad a saturación, profundidad 0-30 cm*



Gaussian model ( $C_0 = 6.60000$ ;  $C_0 + C = 43.20000$ ;  $A_0 = 795.00$ ;  $r^2 = 0.870$ ;  
RSS = 97.9)

Figura 34A

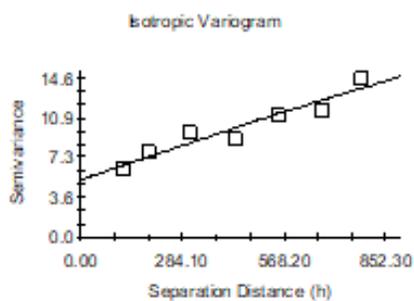
*Semivariograma del parámetro humedad a saturación, profundidad 30-60 cm*



Spherical model ( $C_0 = 2.29000$ ;  $C_0 + C = 16.02000$ ;  $A_0 = 732.00$ ;  $r^2 = 0.931$ ;  
RSS = 9.22)

Figura 35A

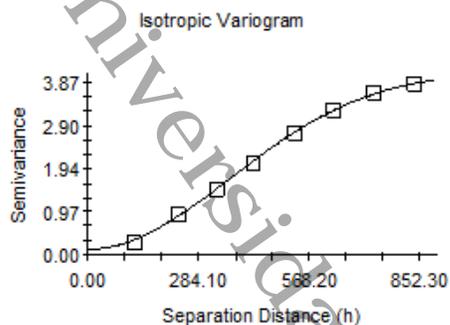
*Semivariograma del parámetro humedad a saturación, profundidad 60-90 cm*



Spherical model ( $C_0 = 5.23000$ ;  $C_0 + C = 21.13000$ ;  $A_0 = 2110.00$ ;  $r^2 = 0.919$ ;  
RSS = 3.76)

**Figura 36A**

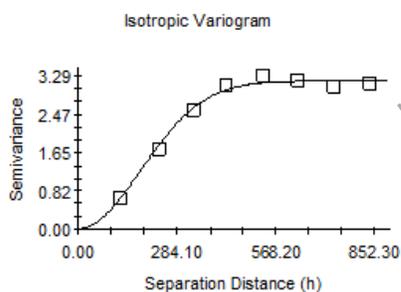
*Semivariograma de lámina de punto de marchitez permanente, 0-90 cm*



Gaussian model ( $C_0 = 0.12000$ ;  $C_0 + C = 4.12400$ ;  $A_0 = 513.00$ ;  $r^2 = 1.000$ ;  
RSS = 4.578E-03)

**Figura 37A**

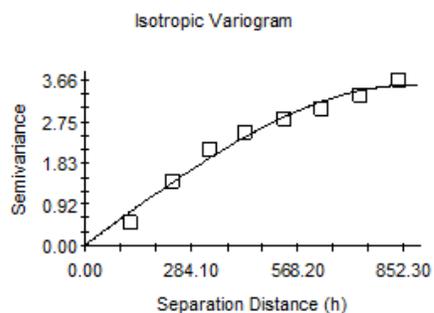
*Semivariograma de lámina de capacidad de campo, profundidad 0-90 cm*



Gaussian model ( $C_0 = 0.01000$ ;  $C_0 + C = 3.18500$ ;  $A_0 = 255.00$ ;  $r^2 = 0.990$ ;  
RSS = 0.0596)

**Figura 38A**

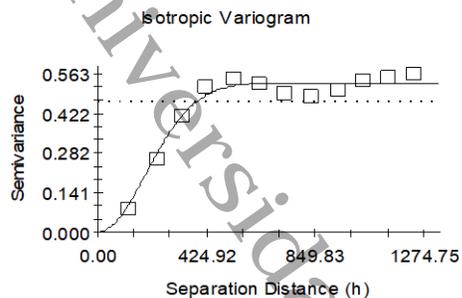
*Semivariograma de lámina de humedad a saturación, profundidad 0-90 cm*



Spherical model ( $C_0 = 0.01000$ ;  $C_0 + C = 3.55200$ ;  $A_0 = 871.00$ ;  $r^2 = 0.979$ ;  
RSS = 0.164)

**Figura 39A**

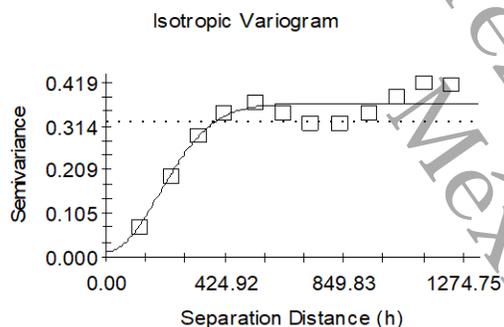
*Semivariograma de lámina de capacidad de campo, profundidad 0-30 cm*



Gaussian model ( $C_0 = 0.00100$ ;  $C_0 + C = 0.53000$ ;  $A_0 = 268.00$ ;  $r^2 = 0.966$ ;  
RSS = 7.816E-03)

**Figura 40A**

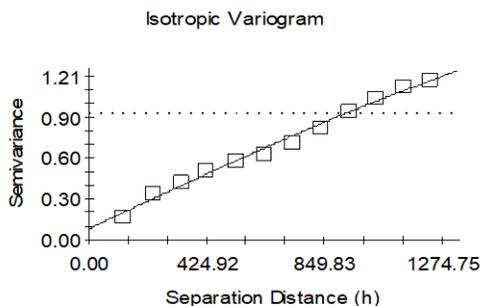
*Semivariograma de lámina de capacidad de campo, profundidad 30-60 cm*



Gaussian model ( $C_0 = 0.01200$ ;  $C_0 + C = 0.36800$ ;  $A_0 = 268.00$ ;  $r^2 = 0.904$ ;  
RSS = 0.0103)

**Figura 41A**

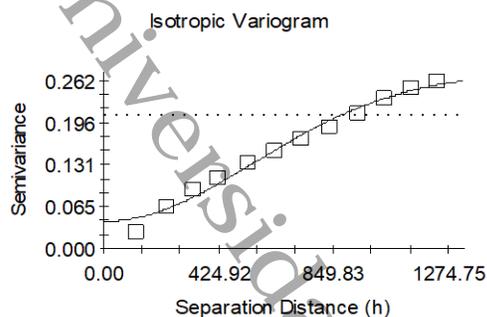
*Semivariograma de lámina de capacidad de campo, profundidad 0-30 cm*



Spherical model ( $C_0 = 0.08100$ ;  $C_0 + C = 1.74600$ ;  $A_0 = 2602.00$ ;  $r^2 = 0.990$ ;  
RSS = 0.0110)

Figura 42A

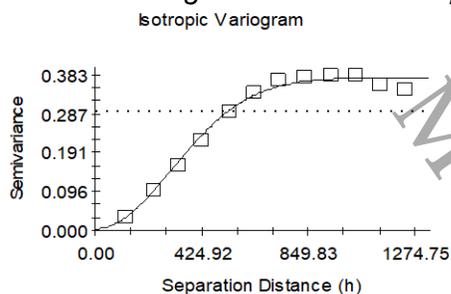
*Semivariograma de lámina de punto de marchitez permanente, profundidad 0-30 cm*



Gaussian model ( $C_0 = 0.04250$ ;  $C_0 + C = 0.27500$ ;  $A_0 = 788.00$ ;  $r^2 = 0.983$ ;  
RSS =  $1.054E-03$ )

Figura 43A

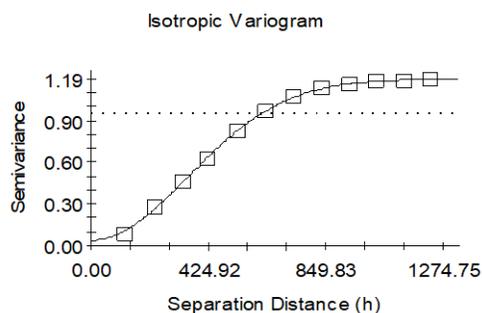
*Semivariograma de lámina de punto de marchitez permanente, profundidad 30-60 cm*



Gaussian model ( $C_0 = 0.00500$ ;  $C_0 + C = 0.37600$ ;  $A_0 = 432.00$ ;  $r^2 = 0.988$ ;  
RSS =  $1.996E-03$ )

Figura 44A

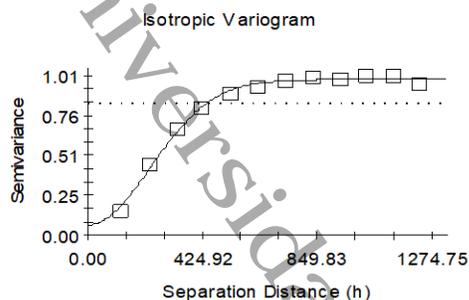
*Semivariograma de lámina de punto de marchitez permanente, profundidad 60-90 cm*



Gaussian model ( $C_0 = 0.03900$ ;  $C_0 + C = 1.19600$ ;  $A_0 = 498.00$ ;  $r^2 = 1.000$ ;  
RSS =  $7.971E-04$ )

**Figura 45A**

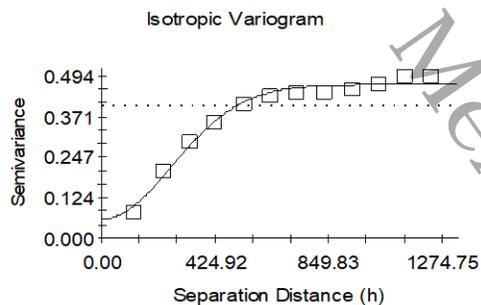
*Semivariograma de lámina de humedad a saturación, profundidad 0-30 cm*



Gaussian model ( $C_0 = 0.06300$ ;  $C_0 + C = 0.98600$ ;  $A_0 = 327.00$ ;  $r^2 = 0.994$ ;  
RSS = 5.225E-03)

**Figura 46A**

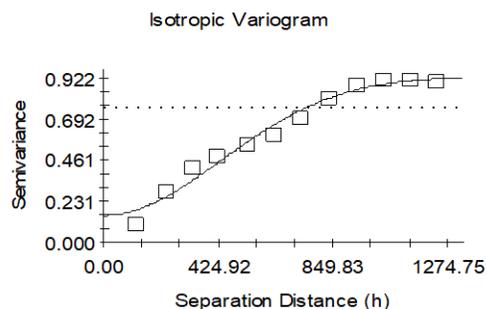
*Semivariograma de lámina de humedad a saturación, profundidad 30-60 cm*



Gaussian model ( $C_0 = 0.05800$ ;  $C_0 + C = 0.46700$ ;  $A_0 = 371.00$ ;  $r^2 = 0.983$ ;  
RSS = 3.051E-03)

**Figura 47A**

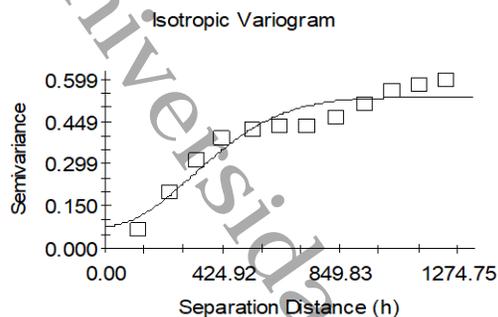
*Semivariograma de lámina de humedad a saturación, profundidad 60-90 cm*



Gaussian model ( $C_0 = 0.15300$ ;  $C_0 + C = 0.93300$ ;  $A_0 = 616.00$ ;  $r^2 = 0.973$ ;  
RSS = 0.0217)

**Figura 48A**

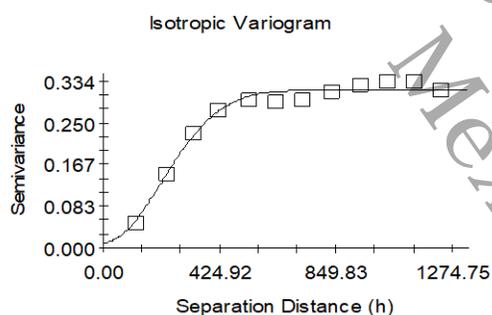
*Semivariograma de lámina de reposición (100%), profundidad 0-30 cm*



Gaussian model ( $C_0 = 0.07900$ ;  $C_0 + C = 0.53800$ ;  $A_0 = 449.00$ ;  $r^2 = 0.922$ ;  
RSS = 0.0214)

**Figura 49A**

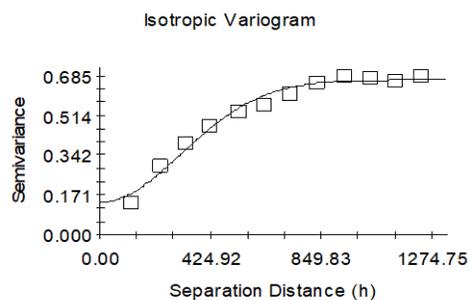
*Semivariograma de lámina de reposición (100%), profundidad 30-60 cm*



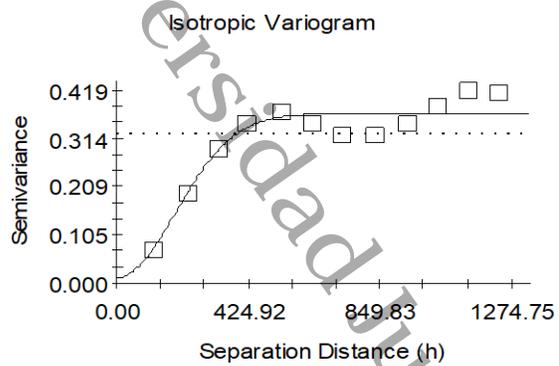
Gaussian model ( $C_0 = 0.01090$ ;  $C_0 + C = 0.31680$ ;  $A_0 = 300.00$ ;  $r^2 = 0.983$ ;  
RSS = 1.402E-03)

**Figura 50A**

*Semivariograma de lámina de reposición (100%), profundidad 60-90 cm*



Gaussian model ( $C_0 = 0.13900$ ;  $C_0 + C = 0.66800$ ;  $A_0 = 440.00$ ;  $r^2 = 0.979$ ;  
RSS = 6.927E-03)

**Figura 51A***Semivariograma de lámina de reposición*

Gaussian model ( $C_0 = 0.01200$ ;  $C_0 + C = 0.36800$ ;  $A_0 = 268.00$ ;  $r^2 = 0.904$ ;  
RSS = 0.0103)

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.

<b>Alojamiento de la tesis en el repositorio institucional</b>	
<b>Título de la Tesis:</b>	Distribución espacial de la lámina de agua de riego almacenada en un suelo Gleysol, con uso de los SIG
<b>Autor de la Tesis:</b>	Manuel David Sosa García
<b>ORCID</b>	<a href="https://orcid.org/0009-0003-1477-5026">https://orcid.org/0009-0003-1477-5026</a> <a href="https://orcid.org/0009-0003-1477-5026">https://orcid.org/0009-0003-1477-5026</a>
<b>Resumen de la Tesis</b>	<p>El suelo presenta características físicas y químicas variables en el espacio y tiempo; una de ellas es la capacidad de retención de agua, que depende de los parámetros: textura, densidad aparente, punto de marchitez permanente y capacidad de campo. Una herramienta informática para estimar la distribución espacial de los suelos son los Sistemas de Información Geográfica, los cuales permiten la interpolación, clasificación y mapeo de las características del suelo. Por ello, el presente trabajo tuvo como objetivo aplicar los sistemas de información geográfica para mostrar la distribución espacial de la lámina de agua almacenada en un suelo Gleysol en la finca "La Victoria", Teapa, Tabasco. Se realizó un muestreo de grillas sistemático en un el área de 168 ha, donde se tomaron muestras de suelo para conocer la densidad aparente, textura, punto de marchitez permanente, capacidad de campo y humedad a saturación, con base a estas se calcularon láminas de almacenamiento de agua a la profundidad 0-90 cm. Con el software GS+ se determinó el mejor modelo para su interpolación (kriging) y geoestadística, posteriormente en el software QGIS se realizó la clasificación y la composición de los mapas. Se encontró una lámina de almacenamiento hasta el punto a saturación, CC, PMP y de reposición entre CC y PMP en promedio de 63.432, 39.37, 23.99, 15.38 cm respectivamente, los modelos que se ajustaron principalmente fueron los esféricos y gaussianos. Se concluye que las láminas de almacenamiento de agua para el estrato 0-90 cm presentan una distribución espacial no homogénea en el área de estudio de 168 ha de la finca "La Victoria" Teapa, Tabasco.</p>
<b>Palabras clave de la Tesis</b>	Lamina de riego, Distribución espacial, Suelo, Sistemas de información geográfica
<b>Referencias citadas:</b>	<p>Aguilera C., M. y Martínez E., R. (1996). Relaciones agua suelo planta atmósfera. Universidad Autónoma Chapingo. Mexico, 304 p.</p> <p>Alemán B., Henrríquez C., Largaespada K. y Ramírez T. (2022). Evaluación de Flecha Seca en palma aceitera (<i>Elaeis guineensis</i> Jacq.) mediante imágenes multiespectrales, Costa Rica. <i>Agronomía Mesoamericana</i>, 33(2): 47557. <a href="https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agromeso/index">https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agromeso/index</a></p> <p>Alonso-Báez, M., López-Guillen, G., &amp; Grajales-Solís, M. (2023). Mejoramiento de las propiedades hidráulicas del suelo en el cultivo de soya mediante el subsuelo. <i>Revista mexicana de ciencias agrícolas</i>, 14(5), 78-89. Epub 15 de septiembre de 2023. <a href="https://doi.org/10.29312/remexca.v14i5.3102">https://doi.org/10.29312/remexca.v14i5.3102</a></p>

# DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA LÁMINA DE AGUA DE RIEGO ALMACENADA EN UN SUELO GLEYSOL, CON USO DE LOS SIG

INFORME DE ORIGINALIDAD

2%

ÍNDICE DE SIMILITUD

## FUENTES PRIMARIAS

1	baadalsg.inflibnet.ac.in Internet	326 palabras — 2%
2	www.researchgate.net Internet	81 palabras — < 1%

EXCLUIR CITAS

ACTIVADO

EXCLUIR FUENTES

DESACTIVADO

EXCLUIR BIBLIOGRAFÍA

ACTIVADO

EXCLUIR COINCIDENCIAS < 50 PALABRAS

U.J.A.T.



DIVISIÓN ACADÉMICA DE  
CIENCIAS AGROPECUARIAS  
JEFATURA DE ESTUDIOS TERMINALES

*E.G.M. P.*