

EVALUACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOS, QUÍMICOS E HIDROLÓGICOS EN SUELOS CON PROBLEMAS DE MAL DRENAJE

EVALUATION OF PHYSICAL, CHEMICAL AND HYDROLOGICAL PARAMETERS IN SOILS WITH POOR DRAINAGE PROBLEMS

Autores: Oscar Brown Manrique¹

<https://orcid.org/0000-0003-3713-3408>

Felicita Zobeida Gómez Lorenzo¹

<https://orcid.org/0000-0002-9564-3572>

Dayma Carmenates Hernández²

<https://orcid.org/0000-0003-0413-3399>

Institución: ¹Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez, Cuba

²Universidad Ricardo Palma, Perú

Correo electrónico: obrown@unica.cu

zobeida@unica.cu

dayma.carmenates@urp.edu.pe

RESUMEN

La investigación se desarrolló en el central azucarero Enrique Varona ubicado en el municipio Chambas de la provincia de Ciego de Ávila en el periodo comprendido entre los años 2012 y 2022 con el objetivo de evaluar los parámetros físicos, químicos e hidrológicos para el mejoramiento de un suelo con drenaje deficiente que contribuya al perfeccionamiento del diseño de un sistema de drenaje parcelario. Los resultados demostraron que el suelo evaluado presenta baja densidad y microporosidad del suelo con una porosidad total elevada. La fracción predominante del análisis granulométrico es la arcillosa con un 67,1 %; lo que explica el funcionamiento hídrico deficiente del suelo. La precipitación de 100,0 mm y el tiempo de drenaje de 1,10 día definen una recarga hídrica de 76,84 mm que representa el 99 % de la recarga por riego. La escorrentía y el caudal de diseño presentan una relación funcional de tipo potencial con la precipitación máxima diaria.

Palabras clave: Escorrentía superficial, Recarga hídrica, Suelo arcilloso.

ABSTRACT

The research was carried out in the Enrique Varona sugar mill located in the Chambas municipality of the Ciego de Avila province in the period between 2012 and 2022 with the objective of evaluating the physical, chemical and hydrological parameters for the

improvement of a soil with deficient drainage that contributes to improving the design of a plot drainage system. The results showed that the evaluated soil presents low density and microporosity of the soil with a high total porosity. The predominant fraction of the granulometric analysis is clayey with 67.1 %; which explains the deficient hydric functioning of the soil. The precipitation of 100.0 mm and the drainage time of 1.10 days define a water recharge of 76,84 mm, which represents 99 % of the recharge by irrigation. The runoff and the design flow present a potential functional relationship with the maximum daily precipitation.

Keywords: Clayey soil, Surface runoff, Water recharge.

INTRODUCCIÓN

La caña de azúcar ha sido históricamente el cultivo de mayor importancia económica para Cuba; pero en la actualidad los rendimientos no sobrepasan las 30 t ha⁻¹ como promedio, resultado entre otros factores, de la degradación del suelo (Domínguez *et al.*, 2012).

El suelo es el medio donde crecen y se desarrollan las plantas, de ahí su importancia para definir las tecnologías a emplear en el manejo de la caña de azúcar teniendo en cuenta el área de cultivo, el uso de la tierra según su potencial productivo, la organización y la conservación del recurso suelo, para el logro de altos rendimientos agrícolas. En la estrategia de manejo agrícola de este cultivo es de gran importancia la evaluación de la variabilidad espacial y temporal de las características del suelo (Benítez *et al.*, 2018).

El estudio de los suelos es fundamental para lograr una agricultura eficiente. Mediante este tipo de trabajo, a partir de la cartografía y caracterización se puede conocer qué tipos de suelos están presentes, el área que ocupa cada uno de ellos, cómo están sus propiedades, y sobre todo los factores edáficos que pudieran ser limitantes para la producción agrícola o factores limitantes agroproductivos, los cuales constituyen uno de los elementos más importantes para lograr una agricultura sostenible (Bernal *et al.*, 2015).

El cambio climático ha originado fenómenos que afectan la producción agrícola, entre los problemas más comunes están las prolongadas sequías y las afectaciones por mal drenaje. Los problemas de mal drenaje natural en los suelos están asociados con lluvias excesivas, condiciones topográficas desfavorables, baja capacidad de infiltración y ascensos prolongados de las aguas subterráneas hasta alcanzar niveles

cercanos a la superficie del terreno (Suárez *et al.*, 2018).

El drenaje es la eliminación del exceso de agua y sales del suelo a partir de una tecnología alterna para un adecuado control de la salinidad y la alcalinidad; de manera tal, que permita el desarrollo normal de la planta (Namuche *et al.*, 2019). Se trata de un proceso que tiene como objetivo, eliminar el exceso de agua del suelo para el mantenimiento sus condiciones de aireación y la actividad biológica, garantizar la expansión del sistema radicular del cultivo, remover sales del suelo y el mantenimiento de su balance salino; así como abatir los niveles freáticos, para evitar que las sales asciendan a la capa radical a través del agua que consumen las plantas (Grassi, 1969).

El exceso de agua en la superficie y el perfil del suelo afecta de manera negativa los resultados agrícolas; por tal motivo, la búsqueda de soluciones adecuadas para el drenaje contribuye a lograr incrementos en los rendimientos agrícolas que pueden ser superiores al 20 % (Polón *et al.*, 2011).

Las precipitaciones abundantes que ocurren durante los periodos húmedos del año, la presencia de suelos arcillosos con baja conductividad hidráulica y las láminas de lluvia diaria superiores a 100 mm causan inundación en la capa superficial de los suelos; así como niveles freáticos someros durante los meses de mayor precipitación (Mendoza *et al.*, 2003).

En Cuba se estima que las áreas con suelos afectados por el mal drenaje y salinización es de 2,7 y 1,0 millones de hectáreas respectivamente que afectan el desarrollo de diferentes cultivos como caña de azúcar, pastos, arroz, frijoles, hortalizas, maíz, etc., en las cuales se dejan de producir en un año de lluvias normales alrededor de 633 209 toneladas de alimentos (Herrera *et al.*, 2011).

Los estudios de drenaje se sustentan en tres aspectos esenciales; el diseño agronómico referido a la estimación del tiempo de drenaje en función de la relación tiempo de drenaje y daño del cultivo; el diseño hidrológico concerniente al cálculo del caudal de diseño en función de la lluvia de diseño para un periodo de retorno entre cinco y diez años; así como el diseño hidráulico referido a la concepción de la red de drenaje con drenes superficiales o subsuperficiales (Bastidas, 2005).

El objetivo de la presente investigación es evaluar los parámetros físicos, químicos e hidrológicos para el mejoramiento de un suelo con drenaje deficiente que contribuya al perfeccionamiento del diseño de un sistema de drenaje parcelario.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se desarrolló en un área de suelo pesado con drenaje deficiente en el central azucarero Enrique Varona destinada al cultivo de caña de azúcar. Esta superficie se encuentra ubicada en el municipio Chambas, a los 22° 10' latitud Norte y los 76° 80' longitud Oeste, al Noroeste de la provincia de Ciego de Ávila.

La investigación analizó una serie de precipitaciones diarias en el periodo comprendido de 2012 al 2022, formada por 11 años de observaciones sistemáticas en la estación pluviométrica Tele-Enrique Varona (CA-842) situada en las coordenadas $X = 262,2$ y $Y = 728,40$ a una altitud de 20,00 msnm. Se aplicó la técnica de estadística descriptiva para analizar los estadígrafos fundamentales de la serie.

Evaluaciones físicas y químicas

Las evaluaciones físicas y químicas realizadas fueron las siguientes: densidad del suelo, densidad de la fase sólida, porosidad total, capacidad de campo, porosidad de aireación o macroporosidad, conductividad hidráulica, análisis granulométrico y materia orgánica. Los análisis se llevaron a cabo en el Laboratorio de Suelos de la provincia de Camagüey.

La densidad del suelo se determinó en condiciones directa de campo mediante el Método del Cilindro (Gabriels y Lobo, 2011; Lampulanés y Cantero, 2002) que consiste en tomar una muestra cilíndrica de suelo, introduciendo un cilindro metálico biselado a la profundidad deseada con el propósito de obtener una muestra de suelo inalterada de volumen conocido. Esta muestra es secada a $110 \pm 5^\circ\text{C}$, hasta alcanzar peso constante (masa de suelo seco). La ecuación utilizada es la siguiente:

$$\rho = \frac{M_{ss}}{V_t} \quad (1)$$

Donde ρ es la densidad del suelo (g cm^{-3}), M_{ss} la masa de suelo seco de la muestra (g), V_t el volumen total que ocupa la muestra dentro del cilindro (cm^3).

La densidad de la fase sólida del suelo se determinó mediante el método del picnómetro o balón volumétrico a partir de la masa del suelo seco sin considerar el espacio poroso (Klein, 2008).

$$\rho_s = \frac{M_{ss}}{(M_{pa} - M_{pas}) - M_{pas}} \quad (2)$$

Donde ρ_s es la densidad de la fase sólida del suelo (g cm^{-3}), M_{ss} es la masa de suelo seco de la muestra (g), M_{pa} la masa del picnómetro con agua (g), M_{pas} la masa del picnómetro con agua y suelo (g).

La porosidad total, la porosidad de aireación o macroporosidad y la capacidad de campo se calcularon a través de las ecuaciones siguientes:

$$P_t = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right) \cdot 100 \quad (3)$$

$$P_a = P_t - H_v \quad (4)$$

$$H_v = \frac{C_c \cdot \rho}{\rho_a} \quad (5)$$

$$C_c = \left(\frac{M_{sh} - M_{ss}}{M_{ss}}\right) \cdot 100 \quad (6)$$

Donde P_t es la porosidad total (%), ρ es la densidad del suelo (g cm^{-3}), ρ_s la densidad de la fase sólida del suelo (g cm^{-3}), P_a la porosidad de aireación o macroporosidad (%), H_v la humedad volumétrica ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), C_c la capacidad de campo (%), ρ_a la densidad del suelo (g cm^{-3}).

La conductividad hidráulica se obtuvo con la utilización de un permeámetro de carga constante a partir de la Ley de Darcy (Novillo *et al.*, 2018).

$$q = K \cdot I \cdot A \quad (7)$$

$$K = \frac{14,40 \cdot z \cdot Q}{h \cdot A} \quad (8)$$

Donde q es la densidad de flujo ($\text{cm}^3 \text{ min}^{-1}$), K la conductividad hidráulica (m día^{-1}), I el gradiente hidráulico, A el área del cilindro (cm^2), z la altura de la muestra de suelo (cm), h la carga de agua impuesta sobre la muestra de suelo (cm), 14,40 factor para convertir la conductividad hidráulica de (cm min^{-1}) a (m día^{-1}).

El análisis granulométrico y de microagregados se efectuó mediante la metodología de la pipeta de Robinson a partir de la cual se obtuvieron las fracciones arcilla ($<2 \mu\text{m}$) y limo ($2-50 \mu\text{m}$). Las arenas ($>50 \mu\text{m}$) fueron obtenidas posteriormente mediante tamizado en húmedo. Las muestras se recolectaron en la superficie del suelo en la profundidad 0-20 cm (Behrends *et al.*, 2016).

La conductividad eléctrica se definió mediante el método del conductímetro para el registro de este parámetro en el extracto de saturación del suelo (Visconti y Paz, 2018).

La materia orgánica se determinó con el método de Walkley y Black o digestión húmeda (Barrezueta *et al.*, 2020) con base en el Dicromato de Potasio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) y el ácido sulfúrico (H_2SO_4).

La variación del manto freático se evaluó mediante el método de freatimetría consistente en la medición de la profundidad del agua freática en tres pozos de

observación colocados en la parte alta, media y baja de la parcela. Los pozos se construyeron con tubos perforados de PVC de 50 mm de diámetro y profundidad de 100,0 mm. Las mediciones de la profundidad del agua freática se realizaron cada tres días conjuntamente con los muestreos de humedad del suelo (Castillo *et al.*, 2019). Con esta información se construyó el hidrograma del nivel freático el cual permite mostrar los ascensos y descensos en los periodos críticos.

Estudios hidrológicos

El estudio hidrológico consistió en la evaluación de la precipitación máxima ocurrida en 24 horas (P_{max}) y el periodo de retorno (T) para duraciones de un día (1 día), dos días (2 días) y tres días (3 días) consecutivos mediante la distribución de Gumbel (Gómez *et al.*, 2019). La información de precipitación máxima permitió la construcción de la curva Precipitación Frecuencia y Duración (PFD) para un periodo de retorno de 10 años.

La recarga por lluvia se determinó a partir de la capacidad de almacenamiento del suelo, la capacidad de almacenamiento disponible y la curva PFD. Se supuso que la recarga se produce cuando el contenido de agua en el suelo es equivalente al 60 % de su capacidad de almacenamiento. El valor de la recarga por lluvia obtenido por este procedimiento se comparó con la recarga por riego (Re_R).

$$C_{alm} = 10 \cdot H \cdot \rho \cdot (C_c - L_p) \quad (9)$$

$$C_{dis} = 0,40 \cdot C_{alm} \quad (10)$$

Donde C_{alm} es la capacidad de almacenamiento del suelo (mm), C_{disp} la capacidad de almacenamiento disponible (mm), H el espesor del perfil del suelo (m), ρ la densidad del suelo (g cm^{-3}), C_c la capacidad de campo (%); L_p el limite productivo (%). Este valor se asumió como el 80 % de la C_c .

El valor de C_{disp} se utilizó como punto inicial en el eje de las ordenadas para trazar una tangente a la curva PFD y luego calcular la recarga por lluvia. El valor de la recarga se determinó a partir de la tangente con la ecuación siguiente:

$$Re_{LL} = tg \alpha = \frac{P_y - C_{disp}}{Td_x} \quad (11)$$

Donde Re_{LL} es la recarga por lluvia (mm), P_y el valor de la precipitación en el eje de las ordenadas de la curva PFD (mm), Td_x el valor del tiempo de drenaje en el eje de las abscisas de la curva PFD (días), C_{disp} la capacidad de almacenamiento disponible (mm).

La escorrentía de diseño se estimó con el método de la Curva Número de Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (González *et al.*, 2018) y el coeficiente de drenaje mediante la ecuación propuesta por Stephen y Mills en el año 1965, a partir del cual se calculó el caudal de diseño que debe atravesar un dren para drenar un área determinada (Sacbajá *et al.*, 2012; Villon, 2004). Las ecuaciones utilizadas fueron las siguientes:

$$Q = \frac{(P_{max}-0,20.S)^2}{(P_{max}-0,80.S)} \quad (12)$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (13)$$

$$Q_{24} = \frac{24.Q}{T_d} \quad (14)$$

$$C_d = 4,573 + 1,62.Q_{24} \quad (15)$$

$$Q_d = C_d.A^{5/6} \quad (16)$$

Donde Q es la escorrentía de diseño (mm), P_{max} la precipitación máxima diaria (mm día⁻¹), S la infiltración potencial (mm), CN el número de curva, Q_{24} la escorrentía en 24 horas (mm), T_d el tiempo de drenaje (h), C_d el coeficiente de drenaje (L h⁻¹), Q_d el caudal de diseño (L s⁻¹), A el área de drenaje (ha).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evaluaciones físicas y químicas

En la Tabla 1 se muestran los valores de la densidad, la porosidad y la capacidad de campo en cada una de las capas del suelo evaluado. Se observa que para una profundidad de 50 cm la densidad del suelo resulta ser relativamente baja; sin embargo, la porosidad total manifiesta valores altos próximos al 60 %. La densidad del suelo y la porosidad están relacionadas con el volumen del suelo y la densidad presenta una relación inversa con la porosidad; por lo que es necesario para las personas involucradas en el uso de la tierra conocer las propiedades físicas del suelo a fin de entender en qué medida estas influyen en el crecimiento de las plantas (Rasche *et al.*, 2020).

Este comportamiento coincide con lo informado por Torres *et al.* (2017) al afirmar que las propiedades físicas del suelo determinan en gran medida su capacidad de uso, la aireación, la capacidad de drenaje y de almacenamiento de agua, la plasticidad y otras, lo que representa un grave problema para el desarrollo de la agricultura sostenible porque modifica el flujo de agua y aire en el suelo, reduce la absorción de

nutrientes y la productividad de los cultivos agrícolas.

Los valores muy bajos de microporosidad influye negativamente en la pobre capacidad del suelo para dejar filtrar el agua hacia capas más profundas del subsuelo (Murray et al., 2021).

Tabla 1. Valores de densidades, porosidades y capacidad de campo.

Profundidad (cm)	ρ (g cm^{-3})	ρ_s (g cm^{-3})	P_T (%)	P_a (%)	Cc (%)
0 - 23	1,02	2,54	59,84	10,68	48,10
24 - 57	1,07	2,59	58,69	6,79	48,50
58 - 82	1,11	2,63	57,79	2,17	50,10
83 - 100	1,22	2,66	54,14	5,24	40,10

Los resultados del análisis granulométrico demuestran que en este suelo las fracciones del suelo presentan la proporción siguiente: arena (11,5 %), limo (18,8 %) y arcilla (67,1 %). Evidentemente el mayor porcentaje corresponde a la fracción arcillosa que repercute fuertemente en el funcionamiento hídrico deficiente del suelo. El análisis granulométrico juega un importante papel en la descripción de la dinámica del agua, en el estudio de las transferencias de masa y energía en una parcela agrícola afectada por problemas de mal drenaje y en la programación de la operación hidráulica de la parcela (Trejo y Rojas, 2022)

En la Tabla 2 se presentan los valores de conductividad eléctrica y materia orgánica. El suelo evaluado tuvo valores de conductividad eléctrica que fluctúan entre 338 y 465 $\mu\text{S cm}^{-1}$. La conductividad eléctrica es un parámetro importante para evaluar la calidad del agua de riego; pues se refiere a la concentración de sales que se mide como conductividad eléctrica; por lo que cuando supera los 3000 $\mu\text{S cm}^{-1}$ se puede afectar al crecimiento de los cultivos sensibles a la salinidad (Medina et al., 2016).

El suelo evaluado tuvo valores de MO de 2,70 % en la capa superior, luego baja de 1,60 % hasta 0.50 % en la última profundidad evaluada. Este descenso está asociado a que en estas profundidades se aprecia la presencia de características verticales. Murray et al. (2011) informan que el contenido de materia orgánica influye en la estructura del suelo, esta se ve mejorada en la medida que el suelo que presenta aportes importantes de residuos vegetales en cantidades suficientes para poder transformar algunas propiedades químicas, físicas, y biológicas del suelo mediante un aumento de la materia orgánica sobre la superficie y lo suficiente para llegar al subsuelo.

Tabla 2. Valores de conductividad eléctrica y materia orgánica.

Profundidad (cm)	C_E ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	MO (%)
------------------	---------------------------------	--------

0 - 23	442,83	2,70
24 - 57	443,00	1,60
58 - 82	338,00	0,60
83 - 100	464,85	0,50

La variación del manto freático en el sentido longitudinal y transversal de la pendiente se muestra en la Figura 1, en la cual se observa que la profundidad del agua se incrementa en el mismo sentido de la pendiente longitudinal, alcanzando profundidades superiores a los 95 cm a una distancia de 82 m del inicio de la parcela; sin embargo, prácticamente se mantiene invariable en el sentido transversal con un valor próximo a los 20 cm de profundidad. Este comportamiento del nivel freático está relacionado con una pendiente del perfil del suelo de 0,15 % y gradiente hidráulico de 0,00072 en el periodo húmedo.

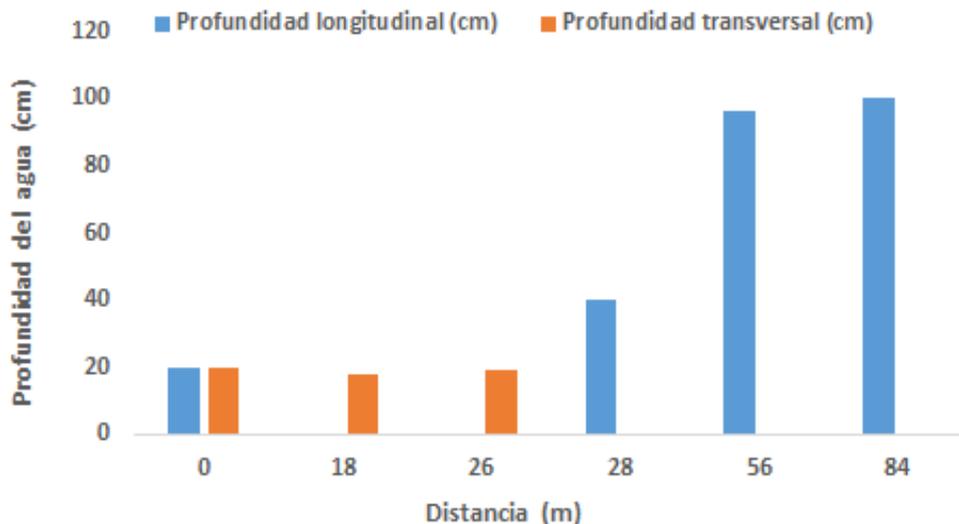


Figura 1. Comportamiento del nivel freático en la dirección longitudinal y transversal.

Estudio hidrológico

En la Tabla 3 se muestran los valores de las precipitaciones máximas para duraciones de 24, 48 y 72 horas, las cuales tuvieron un comportamiento promedio de 69,0; 101,9 mm respectivamente; mientras que en la Tabla 4 se presenta el valor promedio de las precipitaciones máximas anuales fue de 1280,1 mm.

Tabla 3. Valores de las precipitaciones máximas (mm) para duraciones de 24, 48 y 72 horas.

Estadígrafo	24 horas	48 horas	72 horas
Media (mm).	69,0	101,9	159,4
Error típico (mm).	9,4	10,4	13,8
Mediana (mm).	57,6	101,0	146,6
Desviación estándar (mm).	31,1	34,5	45,7
Varianza de la muestra (mm ²)	968,5	1187,9	2086,1
Curtosis	1,7	1,9	-0,2
Coficiente de asimetría	1,4	0,8	0,7
Mínimo (mm).	106,0	133,4	142,5

Máximo (mm).	35,0	44,6	106,4
--------------	------	------	-------

Tabla 4. Valores de las precipitaciones máximas anuales en mm.

Estadísticos	Valor
Media (mm)	1280,1
Error típico (mm)	98,8
Mediana (mm)	1269,8
Desviación estándar (mm)	327,7
Varianza de la muestra (mm ²)	107402,5
Curtosis	-0,6
Coefficiente de asimetría	-0,2

En la Figura 2 se presenta el comportamiento de la curva PFD para un periodo de retorno de 10 años y duraciones de 24, 48 y 72 horas. Estas curvas se ajustan satisfactoriamente a un modelo potencial con elevados coeficientes de determinación (R^2) con valores de 0,9785; 0,9841 y 0,9866 respectivamente.

$$P_{24h} = 55,73 \cdot T_{10}^{0,276} \quad (17)$$

$$P_{48h} = 85,65 \cdot T_{10}^{0,222} \quad (18)$$

$$P_{72h} = 136,73 \cdot T_{10}^{0,194} \quad (19)$$

Donde P_{24h} , P_{48h} , y P_{72h} , son las precipitaciones máximas diarias para duraciones de 24, 48 y 72 horas respectivamente, T_{10} el periodo de retorno para 10 años.

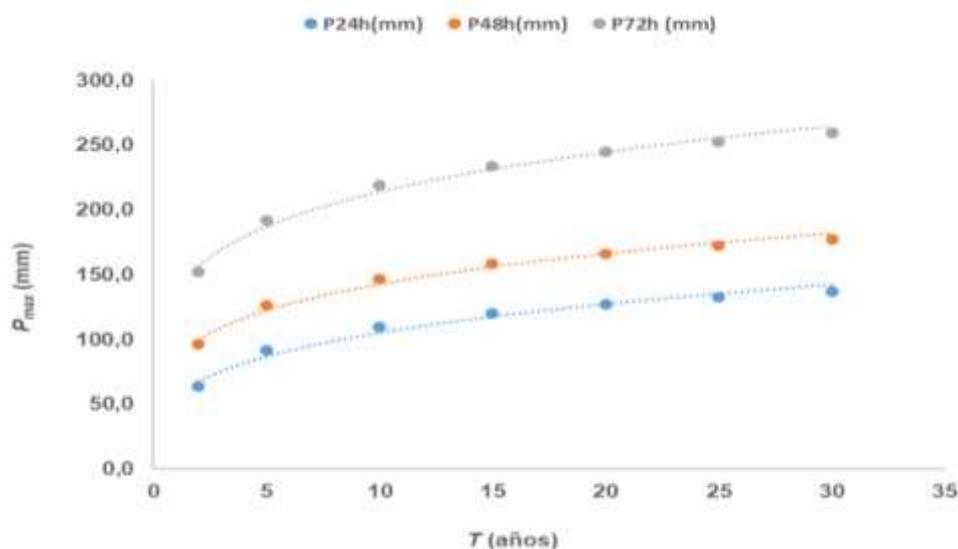


Figura 2. Curva PFD para un periodo de retorno de 10 años.

Recarga por lluvia

El cálculo de la recarga por lluvia indicó que para un perfil de suelo de 50 cm de profundidad la capacidad de almacenamiento del suelo es de 38,70 mm y la capacidad de almacenamiento disponible de 15,48 mm. La recta tangente trazada a la curva PFD a partir del valor de la capacidad de almacenamiento disponible (Figura 3) permitió conocer que los valores de precipitación máxima y tiempo de drenaje fueron de 100,0

mm y 1,10 día respectivamente para una recarga de 76,84 mm que representa el 99 % de la recarga por riego. Este valor muestra que los problemas más graves de drenaje se producen a causa de las precipitaciones en el periodo lluvioso por ser el principal factor de recarga.

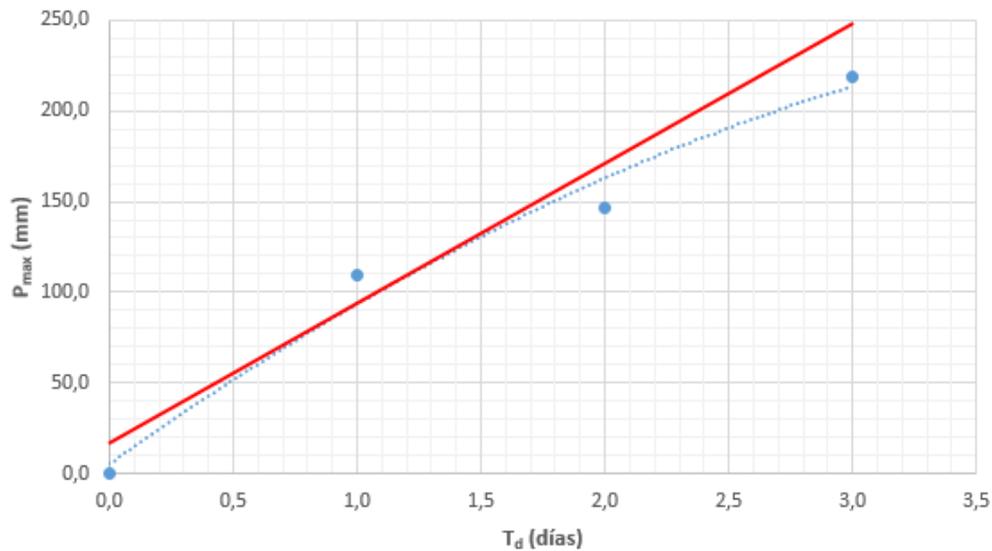


Figura 3. Recta tangente a la curva PFD para calcular la recarga por lluvia.

Escorrentía de diseño

En la Tabla 5 se muestran los resultados del cálculo del caudal de escorrentía y caudal de diseño para tiempo de drenaje (T_d) de 24, 48 y 72 horas y en las Figuras 4 y 5 las relaciones funcionales entre la escorrentía y la precipitación máxima diaria; así como entre el caudal de diseño y la precipitación máxima diaria respectivamente.

Tabla 5. Cálculo del caudal de escorrentía y caudal de diseño.

T_d (horas)	P_{max} (mm)	Q (mm)	Q_{24} (mm)	C_d (L h ⁻¹)	Q_d (L s ⁻¹)
24	109,6	128,7	128,7	213,1	104,1
48	146,8	164,3	82,2	137,7	67,3
72	218,9	235,1	78,4	131,5	64,2

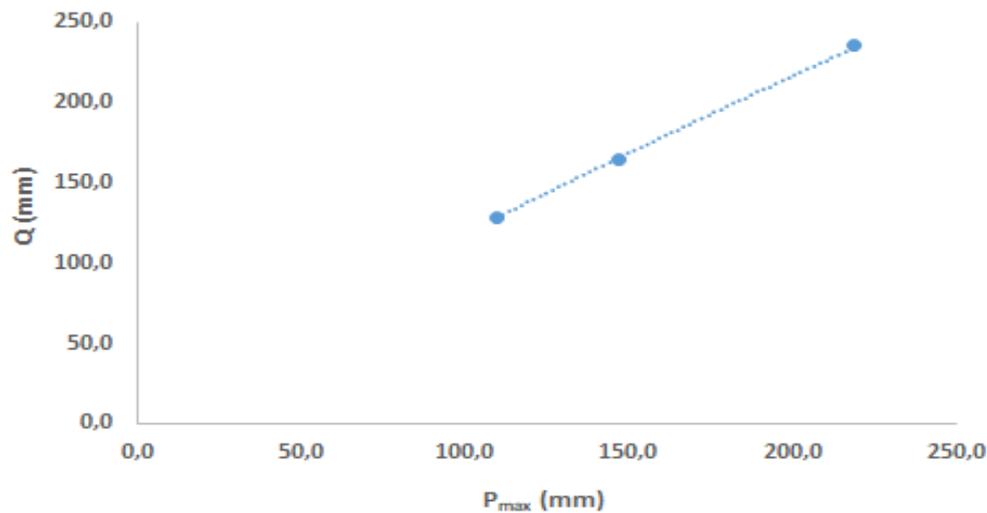


Figura 4. Relacion funcional entre la escorrentía y la precipitación máxima diaria.

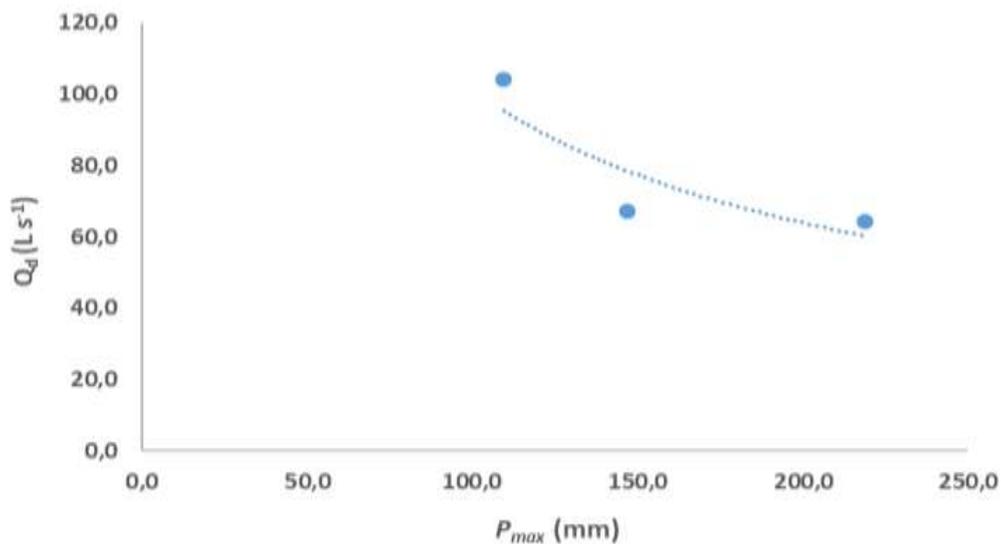


Figura 5. Relacion funcional entre el caudal de diseño y la precipitación máxima diaria.

Los resultados de la Tabla 5 permitieron encontrar tres ecuaciones para estimar el caudal de diseño para tiempos de drenaje de 24, 48 y 72 horas en función del área de la parcela que se pretende drenar.

$$Qd_{24} = 213,10. A^{5/6} \quad (20)$$

$$Qd_{48} = 137,70. A^{5/6} \quad (21)$$

$$Qd_{72} = 131,50. A^{5/6} \quad (22)$$

Se demostró que existe una relación potencial positiva entre la escorrentía y la precipitación máxima diaria y una relación potencial negativa entre el caudal de diseño y la precipitación máxima diaria. En ambos casos los coeficientes de determinación (R^2) fueron de 0,9996 y 0,7474 respectivamente.

$$Q = 2,14. P_{max}^{0,872} \quad (23)$$

$$Q_d = 2149 \cdot P_{max}^{-0,663} \quad (24)$$

Donde Q es la escorrentía de diseño (mm), Q_d el caudal de diseño ($L \text{ s}^{-1}$), P_{max} la precipitación máxima diaria (mm día^{-1}).

CONCLUSIONES

El suelo evaluado presenta valores bajos de densidad del suelo y microporosidad; sin embargo, la porosidad total manifiesta valores altos próximos al 60 %.

Los resultados del análisis granulométrico demuestran que la fracción arcillosa es la predominante con un 67,1 %, lo que explica el funcionamiento hídrico deficiente del suelo.

Los valores de conductividad eléctrica fluctúan entre 338 y 465 $\mu\text{S cm}^{-1}$, menor que 3000 $\mu\text{S cm}^{-1}$; por lo que no se espera afectaciones en el crecimiento y desarrollo de la caña de azúcar.

La precipitación de 100,0 mm y el tiempo de drenaje de 1,10 día definen una recarga hídrica de 76,84 mm que representa el 99 % de la recarga por riego.

Se encontró una relación potencial de la escorrentía y el caudal de diseño con la precipitación máxima diaria.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARREZUETA, S. ... [et al.] (2020). Evaluación del método de ignición para determinar materia orgánica en suelos de la provincia el oro-ecuador. *Fave. Sección ciencias agrarias*, Vol. 19, No. 2, pp. 25-26.
- BASTIDAS, O. (2005). Formulación de alternativas de drenaje superficial para la Hacienda La Glorietta-Sta. Bárbara del Zulia. Tesis de Maestría. Bárbara del Zulia, Venezuela: Ed. Universidad de los Andes, p. 220.
- BEHRENDTS, F. ... [et al.] (2016). Efectividad de distintos pretratamientos en el análisis granulométrico de tres suelos contrastantes de la Región Pampeana. *Revista Ciencia del suelo*, Vol. 34, No. 1, pp.163-172.
- BENÍTEZ, L. ... [et al.] (2018). Contribución al manejo sostenible del cultivo de la caña de azúcar en Cuba. *Revista Ingeniería Agrícola*, Vol. 8, No. 2, pp. 62-67.
- BERNAL, A. ... [et al.] (2015). Características de los suelos y sus factores limitantes de la región de murgas, provincia La Habana. *Cultivos Tropicales*, Vol. 36, No. 2, pp. 30-40.
- CASTILLO, E. ... [et al.] (2019). Diseño y evaluación de un sistema de drenaje parcelario subterráneo controlado. SEMARNA-IMTA. Disponible en:

221

<https://www.riego.mx/congresos/comeii2019/docs/ponencias/presentacion/COMEL-19053.pdf>. Visitado: 12 de abril de 2022.

- DOMÍNGUEZ, C. ... [et al.] (2012). Evaluación en condiciones de laboratorio de la calidad de labor de la maqueta experimental del C-101XV en la preparación de suelo ferralítico rojo compactado. *Revista Ingeniería Agrícola*, Vol. 2, No. 2, pp. 9-13.
- GABRIELS, D. y LOBO, D. (2011). Métodos para determinar granulometría y densidad aparente del suelo. *Venesuelos*, No. 14, pp. 37-48.
- GÓMEZ, Y. M., BOLFARINE, H. y GÓMEZ, H. W. (2019). Gumbel distribution with heavy tails and applications to environmental data. *Mathematics and Computers in Simulation*, No. 157, pp. 115-129.
- GONZÁLEZ, J. A., HERRERA, J. y DÍAZ, Y. (2018). Parámetros de diseño del sistema de drenaje superficial en áreas forrajeras. *Revista Ingeniería Agrícola*, Vol. 8, No. 4, pp. 12-20.
- GRASSI, C. (1969). Manual de drenaje agrícola. Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras (CIDIAT). Disponible en: <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/14406>. Visitado: 18 de mayo de 2023.
- HERRERA, J. ... [et al.] (2011). Problemas del drenaje agrícola en Cuba. *Revista Ingeniería Agrícola*, Vol. 1, No. 1, pp. 21-32.
- KLEIN, V. (2008). Física do Solo. São Paulo, Brasil. Ed. Universitaria, 414 p.
- LAMPURLANES, J. y REINSCH, T. G. (2002). Soil buik density and penetration resistance under different till-age and crop management systems and their relationship with barley root growth. *Agron J.*, Vol. 95, No. 3, pp. 526-536.
- MEDINA, E. ... [et al.] (2016). Calidad del agua para riego y suelos agrícolas en Tuxcacuesco, Jalisco. *IDESIA*, Chile, Vol. 34, No. 6, pp. 51-59.
- MENDOZA, J. D. ... [et al.] (2003). Análisis del funcionamiento hidráulico de diferentes tipos de drenaje agrícola en Tabasco, México. *Ingeniería Hidráulica en México*, Vol. 18, No. 2, pp. 107-119.
- MURRAY, N. R. ... [et al.] (2014). La materia orgánica restaura las propiedades físicas de los suelos transportados para nivelar una superficie agrícola. *Revista Educateconciencia*, Vol. 4, No. 5, pp. 155-162.
- MURRAY, N. R. ... [et al.] (2021). La acumulación de materia orgánica mejora el suelo

- en un sistema agroforestal. *Abanico Agroforestal*, No. 3, pp. 1-17.
- NAMUCHE, J. R. ... [et al.] (2019). Desarrollo y evolución del drenaje agrícola en México. *Revista Ingeniería Agrícola*, Vol. 9, No. 4, pp. 27-36.
- NOVILLO, I. D. ... [et al.] (2018). Propiedades físicas del suelo en diferentes sistemas agrícolas en la provincia de Los Ríos, Ecuador. *Temas agrarios*, Vol. 23, No. 2, pp. 177-187.
- POLÓN, R. ... [et al.] (2011). Reseña. Principales beneficios que se alcanzan con la práctica adecuada del drenaje agrícola. *Cultivos Tropicales*, Vol. 32, No. 2, pp. 52-60.
- RASCHE, J. W. ... [et al.] (2020). Compactación del suelo y su efecto en el crecimiento vegetativo de soja, maíz y guandú. *Revista Investigación Agraria*, Vol. 22, No. 1, pp. 13-21.
- SACBAJÁ, A. ... [et al.] (2012). Diseño de un sistema de drenaje subsuperficial a pequeña escala para la remoción de zinc en suelos agrícolas de Almolonga en Guatemala. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, No. 21, pp. 49-53.
- SUÁREZ, H. ... [et al.] (2018). Selección de genotipos de caña de azúcar en zonas con estrés ambiental. *Centro Agrícola*, Vol. 45, No. 3, pp. 66-72.
- TORRES, J., GUTIERREZ, J. A. y BELTRAN, H. A. (2017). Compactación, una de las causas más comunes de la degradación del suelo. *Revista Ciencias Agropecuarias*, Vol. 3, No. 3, pp. 18-22.
- TREJO, M. Z. y ROJAS, H. S. (2022). Modelación numérica de un experimento de drenaje agrícola subterráneo. *South Florida Journal of Development*, Vol. 3, No. 4, pp. 5505-5514.
- VILLON, M. (2004). Drenaje. Centro de Información Tecnológica. Disponible: <https://isbn.cloud/9789968320191/drenaje/>. Visitado: 15 de mayo de 2023.
- VISCONTI, F. y PAZ, J. M. de (2018). Cómo conocer la salinidad del suelo mediante medidas de conductividad eléctrica. *Levante Agrícola*, No. 441, pp. 98-103.

Conflicto de interés

Los autores no declaran conflictos de intereses.



Esta obra está bajo una licencia internacional [Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/). Se permite su copia y distribución por cualquier medio siempre que mantenga el reconocimiento de sus autores, no haga uso comercial de los contenidos y no realice modificación de la misma