

Estado actual y condiciones ecogeográficas de *Manihot esculenta* Crantz en la región Las Montañas, Veracruz

Status and ecogeographical conditions of *Manihot esculenta* Crantz in the Las Montañas Region, Veracruz

José Luis Del Rosario-Arellano¹ , Ricardo Serna-Lagunes^{1*} , Pablo Andrés-Meza¹ , Otto Raúl Leyva-Ovalle¹ , Miguel Cebada-Merino¹ , Ángel Capetillo-Burela² 

¹Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, región Córdoba-Orizaba, Universidad Veracruzana. Calle Josefa Ortiz de Domínguez, S/N, colonia Centro, CP. 94950. Peñuela, Amatlán de los Reyes, Veracruz, México.

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Cotaxtla. Km 34, carretera Veracruz Córdoba, CP. 94270. Medellín de Bravo, Veracruz, México.

*Autor de correspondencia: rserna@uv.mx

Artículo científico

Recibido: 12 de enero 2024

Aceptado: 23 de julio 2024

RESUMEN. El estudio de las condiciones ecogeográficas de especies de interés alimentario como la yuca (*Manihot esculenta* Crantz), tiene implicaciones sobre como esta se adapta a diversas condiciones edafoclimáticas, además genera conocimiento sobre el estado actual del manejo del cultivo en una región agroecológica. El objetivo fue analizar el estado actual, las condiciones ecogeográficas y la distribución potencial de la yuca en nueve municipios de la región “Las Montañas”, Veracruz, México. Se realizaron recorridos de campo para la colecta de accesiones de yuca, que se identificaron con base en descriptores morfológicos y agronómicos para diferenciar el germoplasma; asimismo, se registraron datos pasaporte. Con las georreferencias, se adquirió la información de siete variables edafológicas, 19 variables climáticas y altitud mediante la técnica de ecogeografía; también, se realizó un modelo de nicho ecológico con el algoritmo de máxima entropía para identificar las áreas potenciales del cultivo. La yuca se reportó en huertos de traspatio, solares, huertas de limón, cafetales, cañales, platanales, y zonas con manejo agrícola, pecuario y forestal; en tierras dedicadas a la agricultura de temporal anual y semipermanente, en espacios urbanos; creciendo en suelos acrisol húmico y órtico, andosol húmico, feozem háplico y vertisol crómico. Con un 0.998 del área bajo la curva del modelo de nicho, 27 municipios cuentan con las condiciones edáficas y climáticas para implementar el cultivo de la yuca, pero se requiere de financiamiento para realizar trabajo de campo, evaluar las características morfo-agronómicas de las accesiones ante diferentes ambientes, e implementar un programa de conservación de la diversidad genética.

Palabras clave: Agroecosistemas, conservación, ecogeografía, germoplasma, *Manihot esculenta* Crantz.

ABSTRACT. The study of the ecogeographical conditions of food species such as cassava (*Manihot esculenta* Crantz) has implications for understanding how it adapts to various soil and climatic conditions. Additionally, it generates knowledge about the current state of crop management in an agroecological region. The objective was to analyze the current status, ecogeographical conditions, and potential distribution of cassava in nine municipalities in the “Las Montañas” region of Veracruz, México. Field surveys were conducted to collect cassava accessions, which were identified based on morphological and agronomic descriptors to differentiate the germplasm. Passport data were also recorded. Using georeferences, information on seven soil variables, 19 climatic variables, and altitude was obtained through ecogeographical techniques. Additionally, an ecological niche model using the maximum entropy algorithm was created to identify potential cultivation areas. Cassava was reported in backyard gardens, home gardens, lemon orchards, coffee plantations, sugarcane fields, banana groves, and areas with agricultural, livestock, and forestry management; in lands dedicated to annual and semi-permanent rainfed agriculture, and in urban spaces; growing in humic and orthic Acrisol, humic Andosol, Haplic Phaeozem, and Chromic Vertisol soils. With an area under the curve (AUC) of 0.998 for the niche model, 27 municipalities have the soil and climatic conditions suitable for implementing cassava cultivation. However, funding is needed to conduct fieldwork, evaluate the morpho-agronomic characteristics of the accessions in different environments, and implement a program to conserve genetic diversity.

Key words: Agroecosystems, conservation, ecogeographic, germplasm, *Manihot esculenta* Crantz.

Como citar: Del Rosario-Arellano JL, Serna-Lagunes R, Andrés-Meza P, Leyva-Ovalle OR, Cebada-Merino M, Capetillo-Burela A (2024) Estado actual y condiciones ecogeográficas de *Manihot esculenta* Crantz en la región Las Montañas, Veracruz. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 11(3): e3975. DOI: 10.19136/era.a11n3.3975.

INTRODUCCIÓN

La yuca (*Manihot esculenta* Crantz) es una de las 100 especies que conforman el género *Manihot* (familia Euphorbiaceae) (Nassar 2007), con presencia y distribución geográfica en regiones tropicales y subtropicales del mundo (OECD-FAO 2022). Esta planta es originaria de la región amazónica brasileña, desarrollándose en diversos ambientes de la región intertropical, ya que se ha determinado que, los rangos óptimos para su desarrollo como la temperatura varían entre 20 a 29 °C, de 1 000 a 1 500 mm de precipitación, a altitudes menores a 2 000 msnm, así como en suelos con 5.5 a 8 unidades de pH, profundos, moderadamente fértiles y con buen drenaje (FAO 2022). No obstante, el cultivo se ha dispersado ante un rango de diversas condiciones climáticas y edáficas (Lebot 2020), siendo capaz de tolerar largos periodos de sequía y suelos marginales (Ezui *et al.* 2016); posición que le confiere una valencia ecológica relevante, por lo que es altamente preferida por los agricultores, puesto que permite obtener rendimientos razonables con un bajo nivel de agroinsumos (Howeler *et al.* 2013, Parmar *et al.* 2017).

Por otra parte, el método de propagación de la yuca es exclusivamente asexual, sin embargo, existe una importante diversidad de morfotipos a nivel intraespecífico que se conserva e intercambia por pequeños agricultores y grupos indígenas en regiones climáticas, edáficas y agroecológicas contrastantes (Pérez *et al.* 2019). Esta dinámica promueve el mantenimiento y la introducción de nueva diversidad morfogenética en los sistemas de producción, que, al combinarse con su naturaleza alógama, constituye un mecanismo que facilita el flujo genético (Tovar *et al.* 2016). De lo anterior, los agricultores de África y alrededor del centro de origen de la yuca, se utiliza una amplia diversidad de genotipos adaptados a sus condiciones locales (Kombate *et al.* 2017, Zurita-Benavides 2017), cuya diferenciación, selección y adopción se fundamenta en las características geográficas, morfo-agronómicas, culinarias y tecnológicas (Howeler 2014, Ramos *et al.* 2019). Se destaca que la yuca es un cultivo con amplio número de variedades después del maíz, frijol y calabaza, por lo que estudiar el estado actual y las condiciones donde prospera, es importante para los programas de manejo de la diversidad genética (Mateos-Maces *et al.* 2016).

En la actualidad, la yuca se siembra en 94 países, esencialmente del continente africano (60.9%), asiático (29.4%) y americano (9.6%). Tan solo en el 2021 se cosecharon 319 millones de toneladas de raíces frescas, concentrándose la producción principalmente en Nigeria, República Democrática del Congo, Tailandia, Gana, Brasil e Indonesia (FAOSTAT 2023), con reporte de crecimiento anual superior al 3%, es decir, casi tres veces la tasa de crecimiento poblacional (OECD-FAO 2022). El crecimiento y desarrollo del cultivo de yuca se debe a que satisface las necesidades alimentarias de más de 800 millones de personas en el mundo, sobre todo familias de escasos recursos (Howeler *et al.* 2013, Lebot 2020); y es que la raíz tuberosa se cocina en una amplia variedad de preparaciones culinarias (Tokunaga *et al.* 2018). Así es como, la yuca se encuentra en el 5to lugar dentro de los cultivos energéticos después del maíz, arroz, trigo y papa (FAO 2018), con un aporte mayor de 600 kJ en la ingesta de 100 gramos de yuca, superior a otros cultivos alimenticios (USDA 2019), lo que se explica por la presencia de un alto contenido de carbohidratos en la raíz tuberosa, esencialmente de almidón (Ceballos y de-la-Cruz 2002, Parmar *et al.* 2017); del mismo modo, ocupa el 2do lugar en consumo dentro de las raíces y tubérculos (OECD-FAO 2022).

Conjuntamente de su importancia como alimento, sus particularidades de usos alternativos con alto valor agregado, como la manufactura de productos farmacéuticos, adhesivos, papel, textiles, edulcorantes, agentes saborizantes, lactosa, dextrinas, dextrosa, alimento pecuario, biocombustibles de primera generación (Laxminarayana *et al.* 2016, FAO 2018, Sivamani *et al.* 2018), y la producción de bioplásticos (IFBB 2019), direccionan a la yuca hacia un cultivo del futuro. Por esto, aunque en décadas pasadas era un cultivo de subsistencia, ahora se cataloga como un alimento básico e industrial, por tanto, la yuca puede promover el desarrollo rural y usarse como estrategia para aliviar la pobreza e impulsar la seguridad alimentaria y energética (OECD-FAO 2022).

En México se destina una superficie comercial de 2 120.98 hectáreas para el cultivo, distribuidos en los estados de Tabasco, Morelos, Michoacán, Veracruz, Yucatán, Guerrero y México (SIAP 2023), aunque también crece de forma natural en diversos sistemas de producción, como el huerto familiar (Góngora-Chin *et al.* 2016); no obstante, es evidente su presencia en otros agroecosistemas, en los que debe registrarse su manejo y uso. Al respecto, en la Península de Yucatán, la yuca se cultiva en conjunto con otras raíces y tubérculos en la milpa (makal, camote y jícama), sistema agrícola que también se asemeja en los estados de Oaxaca (Hernández *et al.* 2008, Salazar-Barrientos *et al.* 2016) y Chiapas (Varela y Trabanino 2016). En el estado de Tabasco, culturalmente la raíz tuberosa representa un alimento importante, puesto se le puede encontrar en mercados municipales, adquiriéndola en forma fresca para consumirla como verdura o para preparar “puchero” (cocido con carne de res o ave), o en rebanadas delgadas en forma frita como botana (Centurión-Hidalgo *et al.* 2019), formando parte importante de la economía local y la producción de alimentos (Góngora-Chin *et al.* 2016, Mateos-Maces *et al.* 2016).

En lo que respecta al estado de Veracruz, se cuenta con información sobre las zonas potenciales para el establecimiento del cultivo con base en modelos de zonificación edafoclimática (Del Rosario-Arellano *et al.* 2022), y estudios de colecta de germoplasma en áreas productoras de la zona norte y centro del estado, desde el nivel del mar hasta los 513 m (Meneses *et al.* 2014). En cambio, en la región Las Montañas, a la fecha, no existen registros de presencia de la yuca, usos, condiciones edafoclimáticas y el nivel de conservación del recurso fitogenético, aspectos relevantes que se consideran en esta investigación para el planteamiento de otros proyectos multidisciplinarios de investigación sobre la especie. En este sentido, el objetivo del estudio fue analizar el estado actual, las condiciones ecogeográficas y la distribución potencial de la yuca en la región Las Montañas, Veracruz, México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Recorridos de colecta de accesiones de yuca

Con base en los mapas de zonificación edafoclimática del estado de Veracruz reportados por Del Rosario-Arellano *et al.* (2022), se realizaron recorridos de campo para la colecta de germoplasma de yuca en el periodo de febrero a marzo del 2023 en localidades procedentes de municipios del área de influencia de la Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, ubicada en el municipio de Amatlán de Los Reyes, perteneciente a la región denominada Las Montañas, Veracruz, México. Cabe mencionar que, *in situ*, la yuca se identificó en función de los descriptores de las características morfológicas y agronómicas de la especie, como la forma de las hojas, forma del tallo, arquitectura,

entre otros, lo que permitió la clasificación de las colectas con base en su origen geográfico (Fukuda *et al.* 2010).

En cada sitio de colecta, se registraron datos de pasaporte, los cuales incluían información sobre el donante, además del municipio, localidad, altitud, información agronómica, usos y formas de consumo de la yuca; se hicieron preguntas a los productores acerca de la importancia, amenazas y factores bioculturales sobre el cultivo. La ubicación geográfica de cada sitio de colecta se registró con la aplicación Android Apps & Tools, GPS v. 5.09, posteriormente, las georreferencias se corrigieron con Google Earth Pro®. Con esta información, en el software QGIS® v. 3.28, se elaboró un mapa con los registros de presencia de la yuca, que representan la distribución actual del cultivo en la región de estudio.

Condiciones ecogeográficas y modelo de distribución potencial

Para la obtención de la información ecogeográfica, se elaboró una base de datos con el software Excel® con las coordenadas geográficas de cada sitio de colecta de las accesiones de yuca, misma que se cargó como una capa de puntos en el software QGIS® v. 3.28; adicionalmente, se incorporaron ocho variables edafológicas, siendo éstas: pH, Na (cmol L^{-1}), C.E. (dS m^{-1}), materia orgánica (MO, %), K (cmol L^{-1}), Ca (cmol L^{-1}), Mg (cmol L^{-1}) y carbono orgánico (CO, kg m^{-2}) (Cruz-Cárdenas *et al.* 2014), además de 19 variables climáticas en formato ráster obtenidas de WorldClim del periodo 1970-2000 (Fick y Hijmans 2017). En este sentido, 11 variables fueron de temperatura en °C (Bio1: temperatura media anual; Bio2: rango medio mensual de temperatura; Bio3: isothermalidad; Bio4: estacionalidad de la temperatura; Bio5: temperatura máxima del mes más cálido; Bio6: temperatura máxima del mes más frío; Bio7: rango anual de temperatura; Bio8: temperatura media del trimestre más lluvioso; Bio9: temperatura media del trimestre más seco; Bio10: temperatura media del trimestre más cálido; Bio11: temperatura media del trimestre más frío), y 8 variables de precipitación en mm (Bio12: precipitación anual; Bio13: precipitación del mes más lluvioso; Bio14: precipitación del mes más seco; Bio15: estacionalidad de la precipitación; Bio16: precipitación del trimestre más lluvioso; Bio17: precipitación del trimestre más seco; Bio18: precipitación del trimestre más cálido; Bio19: precipitación del trimestre más frío) (Fick y Hijmans 2017). La obtención de los valores de cada variable en cada coordenada geográfica donde se registró la yuca se ejecutó por medio de la herramienta de análisis ráster denominada Point Sampling Tools del software QGIS® v. 3.28. También se elaboraron mapas con los puntos de presencia de la yuca sobre capas de clima y suelo (INIFAP 1995, García 1998, CONABIO 1999, INEGI 2026), para identificar estas características en el área de estudio.

Para el análisis estadístico de las variables donde la yuca está presente y con el fin de describir las características de clima y suelo, se estimó el promedio y desviación estándar de las accesiones clasificadas en tres rangos altitudinales: 1) < 538 msnm, 2) 539 a 925 msnm y 3) > 926 msnm, es decir, en altitud baja, media y alta, respectivamente. Este tipo de análisis se ha implementado para diferentes tipos de cultivos, como razas de maíz nativo (Hernández-Vázquez *et al.* 2023, Hernández-Salinas *et al.* 2023), kiwi (López-Páez *et al.* 2023), chile manzano (Serna-Lagunes *et al.* 2020), caña de azúcar (Cebada-Merino *et al.* 2024) y mango (Zamudio-Galo *et al.* 2024).

Para robustecer la caracterización ecogeográfica se generó un modelo de nicho ecológico con el algoritmo de máxima entropía en el software MaxEnt® ver. 3.4.1 (Phillips *et al.* 2019). Con los

registros de presencia y su correlación con 28 variables edafoclimáticas y una de altitud, se determinó el área potencial para la producción de yuca como cultivo; modelo que se validó con los valores del área bajo la curva (AUC), puesto permite determinar el desempeño de este, con base en las variables respuesta (Phillips *et al.* 2019). Para ello, en MaxEnt® se modelaron las coordenadas geográficas de ocurrencia de las accesiones de la yuca en conjunto con 7 capas de propiedades del suelo: MO, Mg, K, Na, CO, CE y pH (Cruz-Cárdenas *et al.* 2014); 19 variables climáticas de WorldClim y 8 parámetros bioclimáticos que incluyeron la evaporación en mm (Bio20: evaporación en clima húmedo; Bio21: evaporación en clima seco; Bio22: evaporación anual), la precipitación climática en mm (Bio23: precipitación en clima húmedo; Bio24: precipitación en clima seco; Bio25 precipitación anual) y temperatura por clima en °C (Bio26: temperatura en clima húmedo; Bio27: temperatura en clima seco; Bio28: temperatura mediana) (Fernández-Eguiarte *et al.* 2012).

RESULTADOS

Estado actual de la yuca en la región

Se colectaron 13 accesiones de yuca consideradas como nativas por parte de los agricultores, las cuales se encontraron en 9 de los 57 municipios que comprende la región Las Montañas, Veracruz, lo que representa aproximadamente el 15% de la región con presencia de germoplasma de yuca (Figura 1).

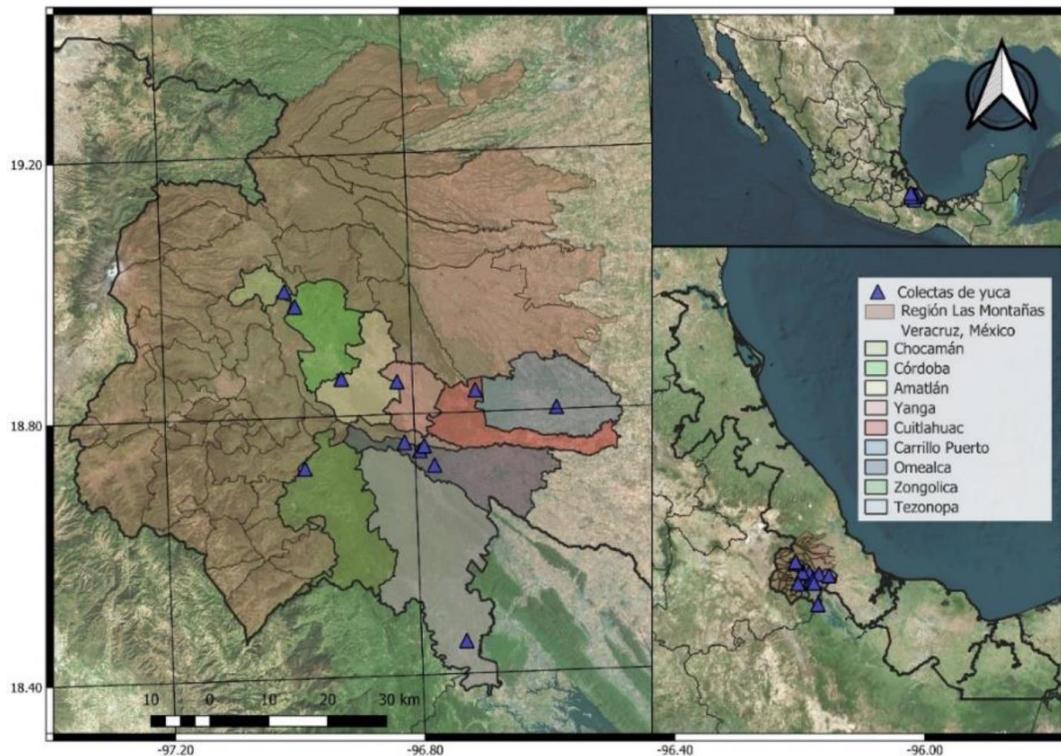


Figura 1. Localidades de colecta de yuca en municipios de la región Las Montañas, Veracruz, México.

Durante los recorridos se pudo constatar la capacidad de la especie para desarrollarse en diversos agroecosistemas. Se encontró que la yuca forma parte de la agrobiodiversidad de los huertos de traspatio (Figura 2a), así como áreas denominadas solares, estos últimos son espacios agrícolas donde fue posible visualizar la yuca como cultivo en una extensión de 200 m², en marcos de plantación de 1.5 x 1 m, como el caso de la colecta MMEXV3 (Figura 2b). Asimismo, fue posible hallarla entre surcos de huertas de limón (*Citrus latifolia*), huertas mixtas de producción de limón con guanábana (*Annona muricata*), cafetales (*Coffea arabica*), cañales (*Saccharum officinarum*) y platanales (*Musa × paradisiaca*), con una variación desde 1 a 50 plantas. En estos espacios es frecuente la conservación de una a dos plantas (Figura 2c, d). Se destaca que solo en el municipio de Amatlán de los Reyes se ubicó un área productora de yuca de aproximadamente 2 000 m² (Figura 2e, f).



Figura 2. Agroecosistemas característicos de los sitios de colecta: a) traspatio, b) solar, c) huerto de limón con guanábana, d) caña de azúcar, e) f) cultivo comercial.

La erosión genética se detecta mediante factores que atentan contra la diversidad de la especie. Con base en los resultados, en la región Las Montañas, la yuca se encuentra amenazada por el abandono del cultivo, y, por ende, la pérdida de las variedades nativas. Sumado a lo anterior, el cambio de uso de suelo representa otro factor de relevancia, puesto los espacios que eran plantados con la especie ahora se ocupan con cultivos económicamente viables como los cítricos o caña de azúcar. De igual modo, el cambio en los hábitos alimenticios representa un papel importante, sobre todo de las nuevas generaciones, quienes poco frecuentan su consumo. Por otro lado, se evidenció que los agricultores fomentan el flujo genético de la yuca, moviendo los recursos fitogenéticos a otras condiciones agroecológicas, como la colecta MMEXV13 de San José Neria, Chocamán, que proviene de un esqueje del municipio de Tezonapa, y que después de 18 años, el productor sigue conservando en su huerto de traspatio (Figura 2a).

Un aspecto biocultural de importancia en las localidades de colecta se refiere a que la yuca se procesa en conserva (dulce tradicional que consiste en trozos cúbicos de yuca hervidas con azúcar o panela). Esta forma de preparación es especial para el día de muertos, destinándose para autoconsumo o su venta local. Ocasionalmente, cuando la yuca se cultiva a gran escala, se orienta para la venta de la raíz tuberosa en fresco. Por otro lado, como parte de las prácticas de manejo agronómico, los agricultores solo aplican un riego de auxilio, mientras tanto, las colectas se catalogan como cultivares tradicionales o variedades nativas, las cuales se conservan en huertos o solares familiares (Tabla 1).

Tabla 1. Información de pasaporte de germoplasma de yuca en Las Montañas, Veracruz, México.

Colecta	Donante	Municipio	Localidad	Uso	MA	CB	FA	EG
MMEXV1	Judith Doroteo N.	Cuitláhuac	Ampliación Manantial	C	A	300	20/22	Sí
MMEXV2	Jaime Marín Hdez.	Carrillo Puerto	Tamarindo	C	A	300	20/22	Sí
MMEXV3	Ciro Romero M.	Omealca	Omealca	C	A	300	20/23	Sí
MMEXV4	Noemí C. A.	Omealca	Xúchiles	VI	A	300	20/21	Sí
MMEXV5	José López	Yanga	La concha	VI	A	300	20/23	Sí
MMEXV6	Juan Islas Acatle	Amatlán	Ermita	V/c	A	300	20/23	Sí
MMEXV7	Gilberto	Amatlán	Ermita	VI	A	300	20/21	Sí
MMEXV8	Josel Apolinar M. P.	Tezonapa	Rancho Buena Vista	VI	A	300	20/21	Sí
MMEXV9	Miriam V. A. O.	Córdoba	El Barreal	VI	A	300	22/22	Sí
MMEXV10	Ricardo F. Xochicale	Omealca	Esperanza	VI	A	300	20/23	Sí
MMEXV11	Jazmín G. Palacios	Tezonapa	Los Cafetos	C	A	300	20/23	Sí
MMEXV12	Juan Islas Acatle	Zongolica	Tecoxco	C	A	300	20/21	Sí
MMEXV13	Manuel R. Suarez	Chocamán	San José Neria	C	A	300	20/23	Sí

Uso: C = conserva; VI = venta local, Vc = venta/conserva; MA = manejo agronómico (A agua); CB = condición biológica o estatus de la accesión (300 cultivar tradicional o variedad nativa); FA = fuente de adquisición (20/21 Campo, 20/22 Huerto, 20/23 Solar o huerto familiar (urbano, periurbano o rural)); EG = erosión genética.

Condiciones ecogeográficas

La yuca se encuentra en condiciones de temperatura y precipitación contrastantes acorde a los rangos altitudinales de la región Las Montañas, Veracruz, México. De acuerdo con la temperatura media anual, esta osciló entre 20.1 a 24.19 °C, con temperaturas máximas del mes más cálido de 29.8 a 33.93 °C, mientras la temperatura mínima se ubicó en 9.8 a 14.3 °C (Tabla 2). Con base en la humedad, el rango altitudinal con mayor precipitación anual se encontró en los municipios ubicados a < 538 msnm, los cuales comprenden a Tezonapa, Carrillo Puerto, Cuitláhuac y Omealca; condición similar en el total de lluvia alcanzado en el mes más húmedo comparado con los rangos de 539 a 965 msnm y > 966 msnm. Además, en el mes más seco existe presencia de precipitación con entre 36.5 a 46.3 mm en los sitios donde la yuca persiste (Tabla 3).

Tabla 2. Información climática de temperatura (°C) de los municipios de colecta de yuca en tres rangos altitudinales presentes en la región Las Montañas, Veracruz, México.

Rango altitudinal	Municipio	BIO1 °C	BIO2 °C	BIO3 °C	BIO4 °C	BIO5 °C	BIO6 °C	BIO7 °C	BIO8 °C	BIO9 °C	BIO10 °C	BIO11 °C
< 538	Tezonapa	25.53	11.72	60.13	247.38	35.3	15.8	19.5	26.98	23	28.17	22.07
	Carrillo Puerto	25.09	12.27	61.95	230.01	35	15.2	19.8	26.38	22.8	27.57	21.88
	Cuitláhuac	24.32	12.38	63.5	226.98	34	14.5	19.5	25.7	23.77	26.65	21.12
	Tezonapa	23.88	12.36	63.05	233.78	33.6	14	19.6	25.32	21.55	26.28	20.60
	Omealca	23.71	12.69	63.78	229.96	33.6	13.7	19.9	25.05	21.47	26.13	20.50
	Omealca	23.52	12.43	63.44	230.98	33.2	13.6	19.6	24.92	21.23	25.9	20.28
	Omealca	23.26	12.31	63.77	227.92	32.8	13.5	19.3	25	20.97	25.6	20.07
	Promedio	24.19	12.31	62.8	232.43	33.93	14.33	19.6	25.62	22.11	26.61	20.93
DE	0.84	0.29	1.34	6.95	0.92	0.88	0.2	0.79	1.07	0.93	0.78	
539 a 965	Yanga	22.76	13.13	64.7	225.5	32.9	12.6	20.3	24.35	20.6	25.2	19.62
	Amatlán	21.74	13.38	65.89	219.56	31.8	11.5	20.3	23.27	19.6	24.07	18.65
	Amatlán	21.74	13.38	65.89	219.56	31.8	11.5	20.3	23.27	19.6	24.07	18.65
	Córdoba	20.15	13.21	65.71	219.75	30	9.9	20.1	21.42	18.03	22.48	17.07
	Promedio	21.6	13.27	65.55	221.09	31.63	11.38	20.25	23.07	19.46	23.95	18.50
DE	1.08	0.12	0.57	2.94	1.2	1.11	0.1	1.22	1.06	1.12	1.06	
> 966	Chocamán	19.79	13.18	65.88	218.6	29.5	9.5	20	21.08	17.67	22.08	16.72
	Zongolica	20.42	13.3	66.5	219.15	30.1	10.1	20	21.67	18.35	22.75	17.35
	Promedio	20.1	13.24	66.19	218.88	29.8	9.8	20	21.38	18.01	22.42	17.03
	DE	0.44	0.09	0.44	0.39	0.42	0.42	0	0.41	0.48	0.47	0.45

BIO1 = temperatura media anual; BIO2 = rango de temperatura media diaria; BIO3 = isotermalidad; BIO4 = estacionalidad de temperatura; BIO5 = temperatura máxima del mes más caliente; BIO6 = temperatura mínima del mes más frío; BIO7 = rango de temperatura anual; BIO8 = temperatura media del trimestre más húmedo; BIO9 = temperatura media del cuatrimestre más seco; BIO10 = temperatura media del cuatrimestre más cálido; BIO11 = temperatura media del cuatrimestre más frío; DE = desviación estándar.

Las colectas de yuca se localizaron en diversos subtipos climáticos, fundamentalmente en el cálido húmedo (Am) y subhúmedo (Aw0, Aw1, Aw2) y semicálido húmedo (A) C (m), (A) C (m) (f) (Figura 3). También subsisten en distintos tipos de suelo, como el acrisol húmico, acrisol ortico, andosol húmico, feozem háplico y en mayor medida del tipo vertisol crómico (Figura 4a). En general, la yuca se halló en zonas con uso de suelo agrícola, pecuario y forestal, dedicadas a la agricultura de temporal anual y semipermanente, además de espacios urbanos (Figura 4b).

Tabla 3. Información climática de precipitación (mm) de los municipios de colecta de yuca en tres rangos altitudinales presentes en la región Las Montañas, Veracruz, México.

Rango altitudinal	Municipio	BIO12	BIO13	BIO14	BIO15	BIO16	BIO17	BIO18	BIO19	
		mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	
< 538	Tezonapa	2601	521	38	94.80	1508	126	632	136	
	Carrillo Puerto	1690	336	25	89.96	954	95	390	114	
	Cuitláhuac	2233	402	40	72.35	1080	156	460	242	
	Tezonapa	2587	455	58	74.77	1259	200	642	233	
	Omealca	2410	423	55	74.33	1158	194	609	224	
	Omealca	2419	423	55	74.65	1163	192	618	224	
	Omealca	2308	404	53	75.65	1114	183	605	206	
	Promedio	2321.14	423.43	46.29	79.50	1176.57	163.71	565.14	197	
	DE	308.96	56.27	12.22	8.96	173.18	40.02	98.67	50.78	
	539 a 965	Yanga	1803	341	44	78.99	903	136	507	146
Amatlán		1669	308	41	78.63	830	127	469	130	
Amatlán		1669	308	41	78.63	830	127	469	130	
Córdoba		1530	281	34	75.91	747	118	420	126	
Promedio		1667.75	309	40	78.04	827.50	127	466.25	133	
DE		111.46	24.56	4.24	1.43	63.75	7.35	35.66	8.87	
> 966		Chocamán	1551	286	34	75.37	756.00	116	424	127
		Zongolica	1714	307	39	76.14	853.00	134	444	149
		Promedio	1632.50	296	36.50	75.75	804.50	125	434	138
		DE	115.26	14.85	3.54	0.55	68.59	12.73	14.14	15.56

BIO12 = precipitación anual; BIO13 = precipitación del mes más húmedo; BIO14 = precipitación del mes más seco; BIO15 = estacionalidad de precipitaciones; BIO16 = precipitación del cuatrimestre más húmedo; BIO17 = precipitación del cuatrimestre más seco; BIO18 = precipitación del cuatrimestre más cálido; BIO19 = precipitación del cuatrimestre más frío; DE = desviación estándar.

En las localidades de colecta se encontraron propiedades de suelo similares (Tabla 4), con valores bajos en los cationes Ca, Mg y K, con 0.61 a 0.65, 0.25 a 0.28 y 0.03 a 0.06 cmol L⁻¹, respectivamente; contenidos de CO de 8.05 a 9.26 kg m⁻² y 0.12 a 0.15 dS m⁻¹ de CE. En cuanto a la materia orgánica, esta varió de 2.58 a 2.83%, además de valores de pH que oscilaron de entre 5.9 a 7.04, para el caso de los municipios de Chocamán y Tezonapa, respectivamente.

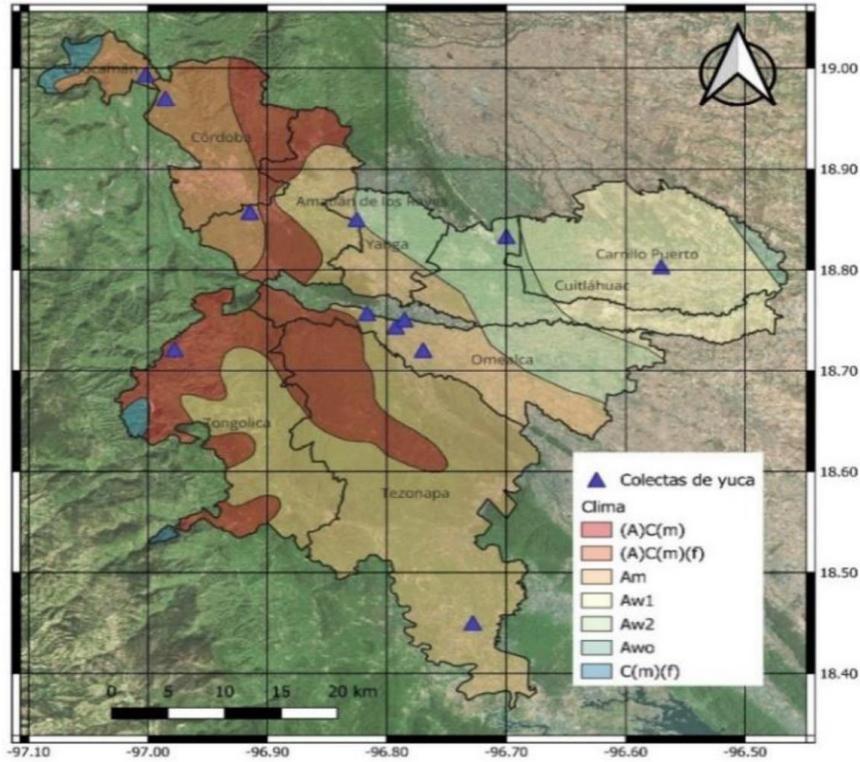


Figura 3. Características del clima en los municipios de colecta de germoplasma de yuca.

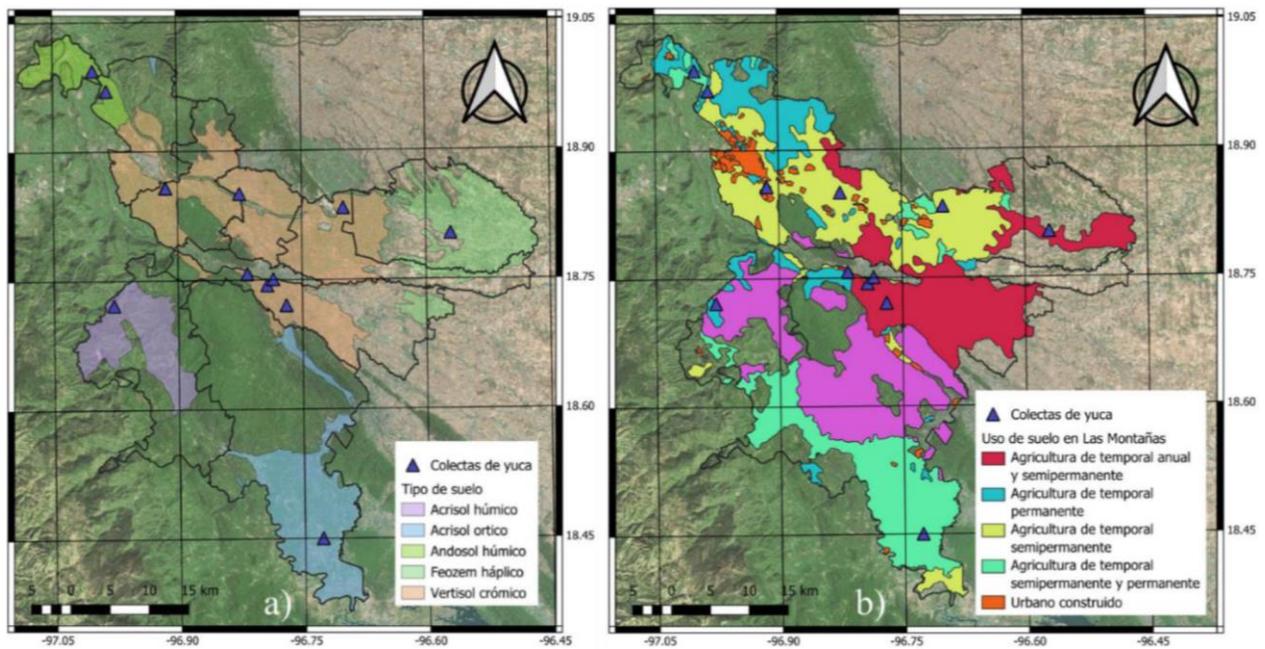


Figura 4. Tipos (a) y uso de suelo (b) de las localidades de colecta de germoplasma de yuca.

Tabla 4. Propiedades de suelo por municipio de colecta de yuca en tres rangos altitudinales en la región Las Montañas, Veracruz, México.

Rango Altitudinal	Municipio	Ca	K	CE	CO	Mg	MO	Na	pH
< 538	Tezonapa	0.67	0.04	0.14	6.34	0.30	2.05	0.25	7.04
	Carrillo Puerto	0.49	0.02	0.11	7.75	0.26	2.55	0.21	6.80
	Cuitláhuac	0.51	0.03	0.11	8.98	0.27	2.87	0.18	6.43
	Tezonapa	0.66	0.04	0.12	8.02	0.28	2.56	0.21	6.70
	Omealca	0.64	0.04	0.12	8.46	0.27	2.72	0.20	6.61
	Omealca	0.65	0.04	0.12	8.43	0.27	2.71	0.20	6.63
	Omealca	0.66	0.03	0.13	8.37	0.28	2.61	0.20	6.58
	Promedio	0.61	0.03	0.12	8.05	0.28	2.58	0.21	6.68
	DE	0.08	0.01	0.01	0.84	0.01	0.26	0.02	0.19
539 a965	Yanga	0.60	0.03	0.12	9.53	0.26	2.97	0.18	6.24
	Amatlán	0.64	0.04	0.13	9.19	0.25	2.80	0.17	6.28
	Amatlán	0.64	0.04	0.13	9.19	0.25	2.80	0.17	6.28
	Córdoba	0.53	0.05	0.14	9.14	0.22	2.78	0.14	5.97
	Promedio	0.61	0.04	0.13	9.26	0.25	2.83	0.17	6.20
	DE	0.05	0.01	0.01	0.18	0.02	0.09	0.02	0.15
> 966	Chocamán	0.51	0.06	0.14	9.09	0.21	2.83	0.13	5.90
	Zongolica	0.78	0.06	0.16	7.59	0.28	2.40	0.21	6.82
	Promedio	0.65	0.06	0.15	8.34	0.25	2.62	0.17	6.36
	DE	0.19	0.00	0.02	1.06	0.05	0.30	0.05	0.65

Ca = calcio (cmol L^{-1}); K = potasio (cmol L^{-1}); CE = conductividad eléctrica (dS m^{-1}); CO = carbono orgánico (kg m^{-2}); Mg = magnesio (cmol L^{-1}); MO = materia orgánica (%); Na = sodio (cmol L^{-1}); DE = desviación estándar.

Modelo de distribución potencial del cultivo de yuca en Las Montañas, Veracruz, México

La eficiencia del modelo de máxima entropía de la yuca obtuvo un AUC de 0.998, en tanto, los municipios con alto potencial de distribución, es decir, zonas con valores mayores de 0.60, corresponden a 27 de los 57 municipios que comprenden la región Las Montañas. Así, tenemos a los municipios de: Tlaltetela, Totutla, Tlacotepec de Mejía, Comapa, Huatusco, Zentla, Tepatlaxco, Ixhuatlán del Café, Tomatlán, Chocamán, Fortín, Córdoba, Atoyac, Ixtaczoquitlán, Amatlán de los Reyes, Yanga, Cuitláhuac, Carrillo Puerto, Naranjal, Tequila, Los Reyes, Coetzala, Zongolica, Cuichapa, Tezonapa, Omealca y Paso del Macho. Esto quiere decir, que la región cuenta con un 47% de municipios con territorio óptimo y una aptitud edafoclimática para el cultivo de yuca (Figura 5).

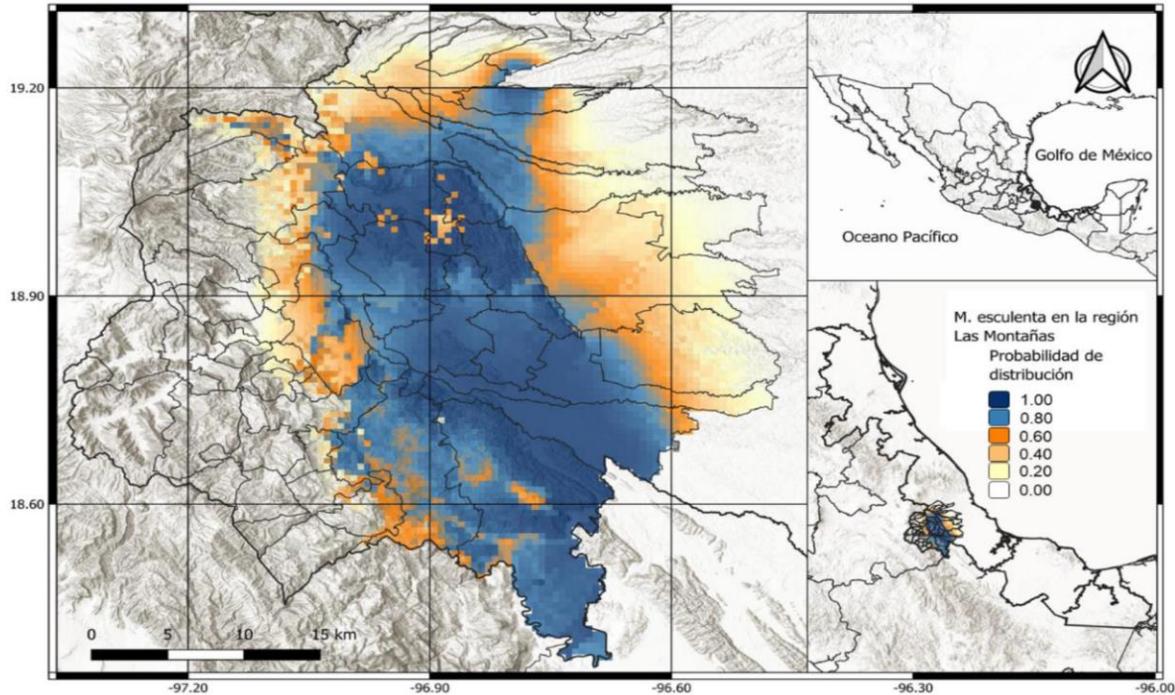


Figura 5. Distribución potencial de la yuca en la región Las Montañas, Veracruz, México.

DISCUSIÓN

Estado actual de la yuca en Las Montañas Veracruz

La yuca está presente en una amplia gama de agroecosistemas con superficies y condiciones de manejo y ecológicas diversas, característicos de los municipios de la región Las Montañas, Veracruz, no obstante, también están presentes paisajes dominantes como las laderas, cañones y montañas, donde es poco probable que se pueda realizar el cultivo. La yuca sigue persistiendo debido al fomento de uso y aprovechamiento continuo para consumo humano o para alimento animal, proceso que puede estar conllevando a la generación de variedades nativas debido a su resiembra en las mismas localidades o en nuevas localidades con ambientes distintos. Por otra parte, Bilate *et al.* (2023) señalan que es común observar la asociación de la raíz tuberosa de yuca con otras especies hortícolas tropicales de interés económico (Santos y de Souza 2021), que incluso es posible encontrarla en sistemas agroforestales compartiendo espacio con *Eucalyptus citriodora* y *Eucalyptus camaldulensis* (Campos y Nazaré 2002).

El uso reportado de la yuca es prácticamente para autoconsumo, lo que coincide con la orientación que se le da en el sur y suroeste de Etiopía, al indicar que el 51.87% de los agricultores la consumen para el sustento familiar, mientras que el 43.68% y 4.26% se destina para el mercado y la alimentación animal, respectivamente (Bilate *et al.* 2023). La preparación de conserva es la única forma de transformación y consumo de la yuca en esta región geográfica de Veracruz, por lo que, a pesar de que el cultivo tiene importancia alimentaria en los trópicos, en México no cuenta gran difusión, por lo tanto, es importante aumentar el conocimiento y fomento de su reproducción como

cultivo, el resaltar sus propiedades alimentarias y beneficios de la salud humana, con miras en la búsqueda de un programa de conservación de este recurso fitogenético (Steinmann 2002).

Un aspecto importante a considerar es el resguardo de al menos dos plantas de yuca en los diversos agroecosistemas recorridos, lo que explica por qué el cultivo no recibe práctica agronómica alguna. En este aspecto, al momento que se observa estrés hídrico en la planta, los agricultores se ven en la necesidad de aplicar riego; aunque también es frecuente el control de malezas de manera regular, propio de un cultivo ya establecido, como el que se lleva a cabo con la colecta MMEXV3. Solo cuando la yuca tenga interés económico, tal es el caso de algunos países que dependen de ella para su alimentación, será cuando se transite al empleo de insumos agroquímicos como herbicidas y fertilizantes químicos, con el afán de alcanzar una alta producción a través del establecimiento de su cultivo intensivo (Santos y de Souza 2021).

Referente a la erosión genética, en los últimos años se ha presentado una merma significativa en la vegetación natural, que, en conjunto con la urbanización, la sustitución de cultivos básicos por plantaciones agrícolas y la deforestación, han provocado un patrón de cambios en el uso de suelo, elementos que amenazan la biodiversidad y seguridad alimentaria (Escobar y Castillo 2021). En este contexto, es indudable la pérdida de material genético de la yuca en la región Las Montañas, la cual está en riesgo al ser desplazada por cultivos de especies económicamente más rentables. De igual modo, aunque existen comunidades con conocimiento tradicional y simbólico de especies de interés alimentario, la erosión cultural ligada a las dinámicas del mercado y el desinterés de la transmisión social del conocimiento de las nuevas generaciones (Rodríguez 2010), es otro factor que promueve la pérdida de germoplasma vegetal. Con lo anterior, Sekiyama *et al.* (2023), demostró que en 15 años la población dejó de consumir y cultivar especies como la yuca, malanga, batatas, frijoles, nueces y verduras, en tanto se sustituyeron por alimentos procesados debido a su facilidad de obtención y bajo costo. En otro orden de ideas, se evidenció el flujo genético de la yuca realizado por los propios agricultores al encontrar el movimiento de material genético desde el municipio de Tezonapa hasta Chocamán; como resultado surgió un cambio en la duración de las etapas fenológicas de la planta, puesto que, con base en el testimonio del donante, se amplió el periodo de crecimiento. De lo antes dicho, se evidenció la adaptación del cultivo a diversos entornos ambientales, aspecto que le permiten su establecimiento en lugares con restricciones ecológicas (Devi *et al.* 2022).

Condiciones ecogeográficas

En un estudio de zonificación agroecológica hecho por Del Rosario-Arellano *et al.* (2022), reportaron que el estado de Veracruz presentó 1.46 millones de hectáreas con potencial para cultivar la yuca sin alguna restricción climática, edáfica o condiciones en su periodo de crecimiento, lo que representó el 20.12% de su territorio; estas áreas se ubicaron sobre todo en las provincias fisiográficas Golfo Norte y Golfo Sur, mientras, en la región Las Montañas resaltaron los municipios de Mixtla de Altamirano, Ixtaczoquitlán, Carrillo Puerto y Zongolica. Es de resaltar que en la presente investigación se encontró germoplasma de yuca en los municipios de Carrillo Puerto y Zongolica (Figura 1), la presencia de este material genético en dichos municipios valida los resultados de los modelos edafoclimáticos para la producción de yuca en Veracruz.

Por su parte, se encontraron 11 colectas distribuidas en Córdoba, Amatlán de los Reyes, Yanga, Cuitláhuac, Omealca y Tezonapa, municipios ubicados en altitudes menores de 1 000 msnm (Tabla 2), resultados coincidentes con la mayor distribución de la yuca a nivel mundial (Bessa *et al.* 2022, Nwokoro *et al.* 2022, Vieira *et al.* 2022, Omodara *et al.* 2023). En este sentido, se reporta que, por arriba de este valor altitudinal, la presencia de plantas de yuca se dificulta, debido en parte a la presencia de condiciones limitantes para la especie, como la baja temperatura y la presencia de heladas.

Las 13 colectas de yuca se encontraron en 9 municipios con condiciones contrastantes, de esta manera presentó una adaptabilidad más amplia que lo reportado para los requerimientos para el desarrollo del cultivo. Su presencia en estos sitios se debió a la relación de temperaturas de entre 20 a 29 °C y precipitaciones de 1 000 a 2 500 mm anuales (Tabla 2), y un régimen de humedad de suelo entre los 180 a 330 días, condiciones climáticas favorables para la especie. Los resultados coinciden con Li *et al.* (2023), al mencionar que la temperatura es el factor con mayor importancia que afecta la distribución potencial en la búsqueda de tierras óptimas para el cultivo. En contraste, se considera que las propiedades edáficas relacionadas con el pH, profundidad, textura, fertilidad, drenaje, pedregosidad y salinidad son las que, en mayor medida, delimitan estos municipios para categorizarlos con aptitud óptima (Del Rosario-Arellano *et al.* 2022). El encontrar la yuca en estos sitios se explica por la amplia adaptación de la especie a condiciones limitantes de suelo (Cook y Connor 2021). Al respecto, es posible su cultivo en suelos de escasa fertilidad como los pastizales, sabanas y matorrales (Li *et al.* 2023), así como terrenos con topografía irregular, donde es frecuente la pérdida de nutrientes debido a la erosión (Bilate *et al.* 2023).

Es conocida la correlación que a mayor altitud hay un descenso continuo de la temperatura (Mujiyo *et al.* 2022, Tabaglio *et al.* 2023), lo que coincide con el presente trabajo (Tabla 2). En este sentido, la presencia de la yuca respondió a un patrón altitudinal, con mayor cantidad de colectas en rangos < 538 msnm, donde incluso se encuentra soportando temperaturas máximas del mes más cálido de hasta 33.93 °C (BIO5), condición que es posible alcanzar en Tezonapa, Carrillo Puerto, Cuitláhuac y Omealca, y es que, la especie puede soportar temperaturas absolutas máximas de 35 °C (FAO 2022). Otra cantidad de colectas considerables se encontraron en rangos altitudinales ubicados entre los 539 a 965 msnm. Al respecto, una temperatura elevada acelera los procesos metabólicos y las etapas fenológicas de las plantas, comparado con las bajas temperaturas, las cuales ocasionan un desarrollo foliar lento, y con ello la pérdida en la eficiencia de la tasa fotosintética (Chaves-Barrantes y Gutiérrez-Soto 2017); en este aspecto, las condiciones óptimas se ubican entre 25 a 35 °C (Mejía 2002), fuera de este límite climático, es posible que la planta disminuya el crecimiento, rendimiento y el desarrollo vegetativo en general (Pushpalatha y Gangadharan 2020).

Por otro lado, el mes más frío, en altitudes mayores a 1 000 msnm (BIO6), situación de algunas zonas de Chocamán, partes altas de Zongolica y Córdoba (Tabla 2), existen condiciones más bajas que la temperatura mínima absoluta que soporta la especie, es decir, los 10 °C (FAO 2022), lo que incide de manera negativa en el desarrollo de la yuca; y aún más porque es posible la presencia de heladas, fenómeno meteorológico relacionado con la muerte de la planta (FAO 1997). En este sentido, las colectas de yuca reportadas en este estudio se distribuyen en zonas con clima cálido subhúmedo con lluvias en verano (Del Rosario-Arellano *et al.* 2022), en tipos de vegetación que corresponden a la selva caducifolia y perennifolia (INEGI 2024), espacios naturales tropicales

donde ha ocurrido la domesticación y semidomesticación de plantas por parte de pueblos indígenas (Boege 2008).

Respecto a las propiedades del suelo, en altitudes superiores la fertilidad se incrementó, esto posiblemente a mayor cantidad de Ca, K, CO, CE y MO, resultado similar a Banday *et al.* (2019), pero distinto a lo reportado por Mujiyo *et al.* (2022), al mencionar que las zonas bajas del distrito de Jatiyoso en Indonesia alcanzaron un índice de fertilidad superior, lo que se atribuye a un moderado valor en el contenido de calcio intercambiable. En el mismo orden de ideas, se sabe que la materia orgánica es un índice de nitrógeno presente en el suelo potencialmente mineralizable, además de nutrientes como P y S, sin embargo, su valor es un referente puesto la mineralización pende de las condiciones físicas del suelo y la calidad de los residuos orgánicos (Salgado-García *et al.* 2006); en relación con esto, se ha documentado que las bajas temperaturas tienen efecto negativo en la tasa de descomposición, que inducen un alto contenido de carbono orgánico seguido con un incremento en el contenido de nitrógeno total (Yang *et al.* 2018, Steinmuller y Chambers 2019), y en consecuencia, provocan un aumento de la fertilidad. Sobre la CE, su valor indicó bajo contenido de sodio, por tanto, se consideran con efectos de salinidad casi nulos (SEMARNAT 2002), situación óptima para el desarrollo de la especie, puesto es capaz de soportar 4 dS m⁻¹. Asimismo, se halló que el cultivo crece en suelos con pH entre 5.5 a 8, propiedad que no condiciona el desarrollo de la especie (FAO 2022). En referencia a los tipos de suelo, los acrisoles pueden sostener cultivos comerciales poco exigentes y ácido-tolerantes, en tanto los andosoles, feozem y vertisoles presentan alto potencial para la producción agrícola, no obstante este último debido a sus características físicas y difíciles relaciones hídricas, causan problemas de manejo (IUUS, 2015), por lo tanto, para implementar su cultivo es necesario prácticas agronómicas que mejoren estas características edáficas.

Distribución potencial en la región Las Montañas, Veracruz, México

El valor de AUC mayor de 0.9 indicó que el modelo presentó un rendimiento excelente (Yan *et al.* 2020), mejor que un modelo aleatorio (Janitza *et al.* 2013). Por lo que, en términos biológicos, el modelo refleja confiabilidad. Al respecto, Pearson *et al.* (2007) mencionaron que, aun con pocos datos de ocurrencias, el modelo MaxEnt genera predicciones adecuadas, teniendo con el modelo de yuca una predicción favorable entre la presencia, con las 29 variables edafoclimáticas y una de altitud. La predicción permitió identificar que los municipios ubicados al oeste, noroeste y suroeste de la región Las Montañas no cuentan con las condiciones de nicho ecológico para el desarrollo de un hábitat adecuado para el cultivo de la yuca, debido a que tienen un clima templado húmedo C(m)(f) y subhúmedo C(w₂), caracterizados por una temperatura media anual de 12 a 18 °C, además de un clima frío E(T)CHw -2 a 5 °C, este último influenciado por el volcán Pico de Orizaba. En contraste, las áreas con alto potencial representan los lugares idóneos para cultivar la yuca, lo que implica que son lugares que cuentan con condiciones edafoclimáticas para el óptimo desarrollo de la especie (Del Rosario-Arellano *et al.* 2022).

CONCLUSIONES

Las 13 accesiones de yuca colectadas en los nueve municipios de Las Montañas, Veracruz se reportan en huertos de traspatio, solares, huertas de limón, cafetales, cañales, platanales, con densidades de 1 a 50 plantas. Las áreas de colecta coinciden con áreas que se clasifican como zonas con manejo agrícola, pecuario y forestal, dedicadas a la agricultura de temporal anual, semipermanente y espacios urbanos. Además, la especie tiene una amplia valencia ecológica, ya que se encuentra adaptada a distintos tipos de suelo: acrisol húmico y órtico, andosol húmico, feozem háplico y vertisol crómico. El área óptima potencial para el cultivo de yuca fue del 47% en la región. Es la primera investigación que realiza la caracterización ecogeográfica de yuca, en el estado de Veracruz, México, pero se requiere realizar trabajo de campo para aumentar las localidades de colecta, caracterizar las accesiones e implementar un programa de conservación de la diversidad genética.

AGRADECIMIENTOS

La presente investigación formó parte del proyecto de investigación “Colecta, caracterización y valorización de germoplasma de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) en la zona centro del estado de Veracruz”, con número de registro DGI: 543132023179, del cual se agradece a la Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, región Córdoba-Orizaba de la Universidad Veracruzana por las facilidades otorgadas, asimismo, a cada uno de los estudiantes de la carrera de ingeniero agrónomo por su esfuerzo y compromiso.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia en esta sección.

LITERATURA CITADA

- Banday M, Bhardwaj DR, Pala NA (2019) Influence of forest type, altitude and NDVI on soil properties in forests of Northwestern Himalaya. India. *Acta Ecologica Sinica* 39(1): 50-55. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2018.06.001>
- Bessa de CRR, Bandeira e SM, Alves de OL, de Oliveira EJ (2022) Phenotypic diversity and selection in biofortified cassava germplasm for yield and quality root traits. *Euphytica* 218(12): 173. <https://doi.org/10.1007/s10681-022-03125-6>
- Bilate DB, Belew YD, Muluaem BT, Gebreselassie AW (2023) Assessment of cassava utilization patterns, postharvest handling practices, and productivity influencing factors in South and Southwest Ethiopia. *Journal of Food Quality* 9914370. <https://doi.org/10.1155/2023/9914370>
- Boege SE (2008) El patrimonio biocultural de los pueblos indígenas de México, hacia la conservación *in situ* de la biodiversidad y agrodiversidad en los territorios indígenas. Instituto Nacional de Antropología e Historia: Comisión Nacional para el Desarrollo de los Pueblos Indígenas. México. 344p.

- Campos de SMJ, Nazaré de PS (2002) Os sistemas agroflorestais como alternativa econômica em pequenas propriedades rurais: estudo de caso. *Ciência Florestal*, Santa Maria 12(1): 135-141.
- Cebada-Merino M, Crescencio-Andrade YE, Serna-Lagunes R, Del Rosario-Arellano JL, Andrés-Meza P, Presa-Parra E, Hernández-Salinas G, Díaz-José J, Leyva-Ovalle OR (2024) Modelación de las características edafológicas de un predio destinado al cultivo de caña de azúcar en Veracruz, México. *Revista de Geografía Agrícola* 72: 1-16. <https://doi.org/10.5154/r.rga.2023.72.9>
- Ceballos H, de la Cruz GA (2002) Taxonomía y morfología de la yuca. En: Ospina B, Ceballos H (eds) *La yuca en el tercer milenio, sistemas modernos de producción, procesamiento, utilización y comercialización*. Centro Internacional de Agricultura Tropical. Cali, Colombia. pp. 16-32.
- Centurión-Hidalgo D, Espinosa-Moreno J, de la Cruz-Lázaro E, Báez-Mendoza L, Sánchez-Ruiz BA, Pérez-Robles LC (2019) Estacionalidad de los vegetales comercializados en los mercados públicos del estado de Tabasco. *Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional* 29(53): 1-16. <https://doi.org/10.24836/es.v29i53.720>
- Chaves-Barrantes NF, Gutiérrez-Soto MV (2017) Respuestas al estrés por calor en los cultivos. II. Tolerancia y tratamiento agronómico. *Agronomía Mesoamericana* 28(1): 255-271. <https://doi.org/10.15517/am.v28i1.21904>
- Cock JH, Connor DJ (2021) Cassava. In: Sadras VO, Calderini DF (eds) *Crop physiology case histories for major crops*. Academic Press. pp. 588-633. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-05018-5>
- CONABIO (1999) *Uso de suelo y vegetación modificado por CONABIO, escala 1:1000000*. Comisión Nacional para el Manejo y Uso de la Biodiversidad. México. <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/usv250s5ugw.html>. Fecha de consulta: 8 de enero de 2024.
- Cruz-Cárdenas G, López-Mata L, Ortiz-Solorio CA, Villaseñor JL, Ortiz E, Silva JT, Estrada-Godoy F (2014) Interpolation of Mexican soil properties at a scale of 1: 1,000,000. *Geoderma* 213: 29-35. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.07.014>
- Del Rosario-Arellano JL, Bolio-López GI, Valadez-González A, Zamora-Peredo L, Aguilar-Rivera N, Meneses-Márquez I, Andrés-Meza P, Leyva-Ovalle OR (2022) Exploration of cassava clones for the development of biocomposite films. *AIMS Materials Science* 9(1): 85-104. <https://doi.org/10.3934/matrs.2022006>
- Devi B, Kumar MN, Chutia M, Bhattacharyya N (2022) Abiotic and biotic stress challenges of cassava in changing climate and strategies to overcome: A review. *Scientia Horticulturae* 305: 111432. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111432>
- Escobar FRE, Castillo SMÁ (2021) Cambios en la cobertura y uso del suelo en la región del Soconusco, Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 12(66): 46-69. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i66.755>
- Ezui KS, Franke AC, Mando A, Ahiabor BDK, Tetteh FM, Sogbedji J, Janssen BH, Giller KE (2016) Fertiliser requirements for balanced nutrition of cassava across eight locations in West Africa. *Field Crops Research* 185: 69-78. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.10.005>
- FAO (1997) *Zonificación agroecológica. Guía general*. Boletín de Suelos de la FAO no 73. Servicio de Recursos, Manejo y Conservación de suelos. Dirección de Fomento de Tierras y Aguas, FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia. <https://www.fao.org/4/W2962S/w2962s00.htm>. Fecha de consulta: 19 marzo 2023.
- FAO (2018) *Food Outlook-Biannual Report on Global Food Markets-November 2018*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italia. 104p.
- FAO (2022) *GAEZ Data Portal*. <https://gaez.fao.org/pages/ecocrop-find-plant>. Fecha de consulta: 19 marzo 2023.

- FAOStat (2023) Data, production, crops. Food and Agriculture Organization. Rome, Italia. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>. 15. Fecha de consulta: 25 de mayo de 2023.
- Fick SE, Hijmans RJ (2017) WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 37(12): 4302-4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Fukuda WMG, CL Guevara, R Kawuki, Ferguson ME (2010) Selected morphological and agronomic descriptors for the characterization of cassava. International Institute of Tropical Agriculture. Ibadan, Nigeria. 19p.
- García E (1998) Climas (clasificación de Koppen, modificado por García). Escala 1:1000000. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad México. <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/clima1mgw.html>. Fecha de consulta: 19 de diciembre de 2023.
- Góngora-Chin RE, Flores-Guido S, Ruenes-Morales M del R, Aguilar-Cordero W del J, García-López JE (2016) Uso tradicional de la flora y fauna en los huertos familiares mayas en el municipio de Campeche, Campeche, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 3(9): 379-389.
- Hernández MM, Torruco UJG, Chel GL, Betancur AD (2008) Caracterización fisicoquímica de almidones de tubérculos cultivados en Yucatán, México. *Ciência e Tecnologia de Alimentos* 28(3): 718-726. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612008000300031>
- Hernández-Salinas G, Serna-Lagunes R, Del Rosario-Arellano JL, Andrés-Meza P, Torres-Cantú GB, Leyva-Ovalle OR, Purroy-Vásquez R, Ramírez-Rivera EJ, Hernández-Hernández M, Fernández-Loyola R (2023) Factores edafoclimáticos, nicho ecológico y distribución potencial de la diversidad de razas de maíz nativo en agroecosistemas indígenas de Las Altas Montañas, Veracruz, México. En: Hernández-Salinas G, Ramírez-Rivera E de J, Purroy-Vásquez R (eds) *Los maíces nativos de Las Altas Montañas, Veracruz*. Instituto Tecnológico Nacional de México/Campus Zongolica. pp. 35-51.
- Hernández-Vázquez LA, Herrera-Gallardo C, Hernández-Salinas G, Guerrero-Ortiz CA, Serna-Lagunes R, Aguilar-Rivera N, Andrés-Meza P, Ramírez-Rivera E de J, Purroy-Vásquez R, Rojas-Ascencio M, López-Morales F (2023) Caracterización ecogeográfica de razas de maíz nativas en Las Altas Montañas, Veracruz. En: Hernández-Salinas G, Ramírez-Rivera E de J, Purroy-Vásquez R (eds) *Los maíces nativos de Las Altas Montañas, Veracruz*. Instituto Tecnológico Nacional de México/Campus Zongolica. pp. 19-34.
- Howeler R (2014) Sustainable soil and crop management of cassava in Asia: A reference manual. CIAT Publication No. 389. Centro Internacional de Agricultura Tropical. Cali. 280p.
- Howeler R, Lutaladio NB, Thomas G (2013) Save and grow: Cassava, a guide to sustainable production intensification. Food and Agriculture Organization 24p. <https://reliefweb.int/report/world/save-and-grow-cassava-guide-sustainable-production-intensification>. Fecha de consulta: 15 de junio de 2023.
- IFBB (2019) Biopolymers facts and statistics, production capacities, processing routes, feedstock, land and water use. Institute for Bioplastics and Biocomposites. <https://www.ifbb-hannover.de/en/facts-and-statistics.html>. Fecha de consulta: 29 de septiembre de 2023.
- INEGI (2016) Diccionario de datos de uso de suelo y vegetación, escala: 1:250 000 (versión 3). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. 215p.
- INEGI (2024) Uso de suelo y vegetación. Instituto Nacional de Estadística y Geografía <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/>. Fecha de consulta: 6 de enero 2024.
- INIFAP (1995) Edafología. Escalas 1:250000 y 1:1000000. Instituto Nacional de investigaciones Forestales y Agropecuarias- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). México. <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/eda251mgw.html>. Fecha de consulta: 19 de diciembre 2023.
- IUSS Working Group WRB (2015) Base referencial mundial del recurso suelo 2014, actualización 2015. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de

- leyendas de mapas de suelos. Informes sobre recursos mundiales de suelos 106. FAO, Roma. <https://www.fao.org/3/i3794es/I3794es.pdf>. Fecha de consulta: 20 de septiembre de 2023.
- Janitza S, Strobl C, Boulesteix A-L (2013) An AUC-based permutation variable importance measure for random forests. *BMC Bioinformatics* 14(119): 1-11. <https://doi.org/10.1186/1471-2105-14-119>
- Kombate K, Dansi D, Dossou-Aminon I, Adjatin A, Kpemoua K, Dansi M, Akpagana K, Sanni A (2017) Diversity of cassava (*Manihot esculenta* Crantz) cultivars in the traditional agriculture of Togo. *International Journal of Current Research in Biosciences and Plant Biology* 4(6): 98-113. <https://doi.org/10.20546/ijcrbp.2017.406.012>
- Laxminarayana K, Mishra S, Soumya S (2016) Good agricultural practices in tropical root and tuber crops. In: Sharma HK, Kaushal P (eds) *Tropical roots and tubers: production, processing and technology*. pp. 183-224. <https://doi.org/10.1002/9781118060858.ch3>
- Lebot V (2020) *Tropical root and tuber crops, cassava, sweet potato, yams and aroids*. 2nd edition, Cabi. 515p. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/book/10.1079/9781789243369.0000>. Fecha de consulta: 9 de octubre de 2023.
- Li Y, Ding F, Hao M, Chen S, Jiang D, Fan P, Qian Y, Wu J (2023) The implications for potential marginal land resources of cassava across worldwide under climate change challenges. *Scientific Reports* 13(1): 15177. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42132-y>
- López-Páez FK, Cruz-Castillo JG, Galindo-Tovar ME, García-Martínez MÁ, Serna-Lagunes R (2023) Potential zones for the cultivation of *Actinidia chinensis* var. *deliciosa* in temperate regions of Veracruz, Mexico. *Agro Productividad* 16(10): 41-48. <https://doi.org/10.32854/agrop.v16i10.2594>
- Maples-Vermeersch M (1992) Regímenes de humedad del suelo, hidrogeografía IV.6.2 Atlas Nacional de México. Vol. II. Escala 1:4000000. Instituto de Geografía, UNAM. México. <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/rehsu4mgw.html>. Fecha de consulta: 9 de octubre de 2023.
- Mateos-Maces L, Castillo-González F, Chávez-Servia JL, Estrada-Gómez JA, Livera-Muñoz M (2016) Manejo y aprovechamiento de la agrobiodiversidad en el sistema milpa del sureste de México. *Acta Agronómica* 65(4): 413-421.
- Mejía de TMS (2002) Fisiología de la yuca (*Manihot esculenta* Crantz). In: Ospina B, Ceballos H (eds) *La yuca en el tercer milenio, sistemas modernos de producción, procesamiento, utilización y comercialización*. Centro Internacional de Agricultura Tropical; Consorcio Latinoamericano y del Caribe de la Investigación y Desarrollo de la yuca; Proyecto IP-3 Mejoramiento de yuca. Colombia. 586p.
- Meneses I, Vázquez A, Rosas X, Becerra E (2014) Colecta y conservación *ex situ* de germoplasma de yuca en el estado de Veracruz. In: Martínez J (ed). XXVI Reunión Científica Tecnológica Forestal y Agropecuaria Tabasco 2014 y III Simposio Internacional en Producción Agroalimentaria Tropical, 6 y 7 de noviembre, Villahermosa, Tabasco, México. pp. 391-396.
- Mujiyo NS, Herawati A, Herdiansyah G, Irianto H, Riptanti EW, Qonita A (2022) Soil fertility index based on altitude: A comprehensive assessment for the cassava development area in Indonesia. *Annals of Agricultural Sciences* 67(2): 158-165. <https://doi.org/10.1016/j.aos.2022.10.001>
- Mujiyo, Nariyanti S, Herawati A, Herdiansyah G, Irianto H, Riptanti EW, Qonita A (2022) Soil fertility index based on altitude: A comprehensive assessment for the cassava development area in Indonesia. *Annals of Agricultural Sciences* 67(2): 158-165. <https://doi.org/10.1016/j.aos.2022.10.001>
- Nassar NM (2007) Wild and indigenous cassava, *Manihot esculenta* Crantz diversity: An untapped genetic resource. *Genetic Resources and Crop Evolution* 54(7): 1523-1530. <https://doi.org/10.1007/s10722-006-9144-y>
- Nwokoro CC, Kreye C, Necpalova M, Adeyemi O, Barthel M, Pypers P, Hauser S, Six J (2022) Cassava-maize intercropping systems in southern Nigeria: Radiation use efficiency, soil moisture dynamics, and

- yields of component crops. *Field Crops Research* 283: 108550. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108550>
- OECD-FAO (2022) OECD-FAO Agricultural Outlook 2022-2031, OECD Publishing, Paris, France. 363p. <https://doi.org/10.1787/f1b0b29c-en>
- Omodara OD, Ige OA, Oluwasola O, Oyebanji AT, Afape OO (2023) Factors influencing cassava farmers' choice of climate change adaption practices and its effect on cassava productivity in Nigeria. *Heliyon* 9(3): E14563. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14563>
- Parmar A, Sturm B, Hensel O (2017) Crops that feed the world: Production and improvement of cassava for food, feed, and industrial uses. *Food Security* 9(5): 907-927. <https://doi.org/10.1007/s12571-017-0717-8>
- Pérez D, Mora R, López-Carrascal C (2019) Conservación de la diversidad de yuca en los sistemas tradicionales de cultivo de la amazonia. *Acta Biológica Colombiana* 24(2): 20. <https://doi.org/10.15446/abc.v24n2.75428>
- Phillips SJ, Dudík M, Schapire RE (2019) Maxent software for modeling species niches and distributions (Version 3.4.1). http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/. Fecha de consulta: 19 de abril de 2024.
- Pushpalatha R, Gangadharan B (2020) Is cassava (*Manihot esculenta* Crantz) a climate "smart" crop? A review in the context of bridging future food demand gap. *Tropical Plant Biology* 13: 201-211. <https://doi.org/10.1007/s12042-020-09255-2>
- Ramos HH, Gonçalves De LD, Castro Da SM, Barelli AMA (2019) Análise da divergência genética entre acessos de *Manihot esculenta* (Crantz) via caracteres morfoagronômicos. *Nativa* 7(1): 1-5. <https://doi.org/10.31413/nativa.v7i1.5575>
- Rodríguez CA (2010) Monitoreos comunitarios para el manejo de los recursos naturales en la Amazonia colombiana, sistemas agrícolas, chagras y seguridad alimentaria. Bogotá: Proyecto Putumayo Tres Fronteras del Programa Trinacional, Tropenbos Internacional Colombia. Colombia. 55p.
- Salazar-Barrientos L de L, Magaña-Magaña MÁ, Aguilar-Jiménez AN, Ricalde-Pérez MF (2016) Factores socio económicos asociados al aprovechamiento de la agrobiodiversidad de la milpa en Yucatán. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 3(9): 391-400.
- Salgado-García S, Palma-López DJ, Lagunes-Espinoza JLC, Castelán-Estrada M (2006) Manual para el muestreo de suelos, plantas y aguas e interpretación de análisis. Colegio de Postgraduados-Campus Tabasco, ISPROTAB. H Cárdenas, Tabasco, México. 90p.
- Santos de QFG, de Souza GI (2021) Aspectos socioeconômicos e ambientais da produção de farinha de mandioca na comunidade quilombola Amazônica do Cuxiú, Bonito/PA. *Nature and Conservation* 14(1): 55-61. <http://doi.org/10.6008/CBPC2318-2881.2021.001.0006>
- Sekiyama M, Tsuchiya K, Roosita K, Matsuda H (2023) Socioecological and dietary change from 2001 to 2015 in rural West Java, Indonesia. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2642208/v1>
- SEMARNAT (2002) Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000 (2002) Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 73p.
- Serna-Lagunes R, Andrés-Meza P, Leyva-Ovalle OR, Del-Rosario-Arellano JL, Merino-Valdés M, Murguía-González J, Galindo-Tovar M, Mejía-Carranza J, Sierra-Macías M, Espinosa-Calderón A, Tadeo-Robledo M, Del Rosario-Arellano J (2020) Ecological niche of semidomesticated populations of *Capsicum pubescens* Ruiz & Pav. based on accessions from Veracruz, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 43(4): 389-397.
- SIAP (2023) Anuario estadístico de la producción agrícola. Secretaria de Agricultura y Desarrollo Regional. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>. Fecha de consulta: 20 de marzo de 2023.

- Sivamani S, Chandrasekaran AP, Balajii M, Shanmugaprakash M, Hosseini-Bandegharai A, Baskar R (2018) Evaluation of the potential of cassava-based residues for biofuels production. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology* 17: 553-570. <https://doi.org/10.1007/s11157-018-9475-0>
- Steinmann VW (2002) Diversidad y endemismo de la familia Euphorbiaceae en México. *Acta Botánica Mexicana* 1: 61-93.
- Steinmuller HE, Chambers LG (2019) Characterization of coastal wetland soil organic matter: implications for wetland submergence. *Science of the Total Environment* 677: 648-659. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.405>
- Tabaglio V, Fiorini A, Ndayisenga V, Ndereyimana A, Minuti A, Nyembo NR, Nyembo ND, Bertoni G (2023) Sustainable intensification of cassava production towards food security in the Lomami Province (DR Congo): Role of planting method and landrace. *Agronomy* 13(1): 228. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010228>
- Tokunaga H, Tamon B, Ishitani M, Ito K, Kim O-K, Ham LH, Le HK, Maejima K, Namba S, Natsuaki KT (2018) Sustainable management of invasive cassava pests in Vietnam, Cambodia, and Thailand. In: Kokubun M, Asanuma S (eds) *Crop production under stressful conditions: application of cutting-edge science and technology in developing countries*. pp: 131-157. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-7308-3>
- Tovar E, Bocanegra JL, Villafañe C, Fory L, Velásquez A, Gallego G, Moreno R (2016) Diversity and genetic structure of cassava landraces and their wild relatives (*Manihot* spp.) in Colombia revealed by simple sequence repeats. *Plant Genetic Resources Characterization and Utilization* 14: 200-210. <https://doi.org/10.1017/S1479262115000246>
- USDA (2019) Food data central, Cassava, raw. U.S. Department of Agriculture. <https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/169985/nutrients>. Fecha de consulta: 22 de diciembre de 2023.
- Varela SCM, Trabanino F (2016) La cacería tradicional chol y tseltal en los acahuals de Palenque: implicaciones para la zooarqueología maya. *Pueblos y Fronteras* 11(22): 165-191. <https://doi.org/10.22201/cimsur.18704115e.2016.22.274>
- Vieira EA, Rangel MAS, Fialho JDF, Ringenberg R, Romano MR, Rinaldi MM, Antonini JCDA (2022) BRS 429: sweet cassava with yellow pulp and high technological and sensory qualities. *Crop Breeding and Applied Biotechnology* 22(4): e43402243. <https://doi.org/10.1590/1984-70332022v22n4c38>
- Yan H, Feng L, Zhao Y, Feng L, Wu D, Zhu C (2020) Prediction of the spatial distribution of *Alternanthera philoxeroides* in China based on ArcGIS and MaxEnt. *Global Ecology and Conservation* 21: e00856. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00856>
- Yang Y, Luo J, Li H, Zhang G, Huang Y, Li Y, Zhou H, Zhang L, He H, Wei Y (2018) Soil physicochemical properties and vegetation structure along an elevation gradient and implications for the response of alpine plant development to climate change on the northern slopes of the Qilian Mountains. *Journal of Mountain Science*. 15: 1006-1019. <https://doi.org/10.1007/s11629-017-4637-z>
- Zamudio-Galo M, Serna-Lagunes R, Andrés-Meza P, Galindo-Tovar ME, Del-Rosario-Arellano JL, Cruz-Castillo JG (2024) Factores edafoclimáticos y productividad de tres variedades de mango (*Mangifera indica* L) en Veracruz, México. *Revista Acta Agronómica* 72(2): 146-155. <https://doi.org/10.15446/acag.v72n2.111668>
- Zurita-Benavides MG (2017) Cultivando las plantas y la sociedad waorani. *Boletim Do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas* 12(2): 495-516. <https://doi.org/10.1590/1981.81222017000200013>