



## DISTRIBUCIÓN Y CARACTERIZACIÓN ECOGEOGRÁFICA DE MAÍCES NATIVOS DE QUERÉTARO, MÉXICO

## DISTRIBUTION AND ECOGEOGRAPHICAL CHARACTERIZATION OF MAIZE NATIVE TO QUERÉTARO, MEXICO

Rosalinda González-Santos<sup>1</sup>, Luis Hernández-Sandoval<sup>1\*</sup>,  
Karla Nicol Hernández-Puente<sup>2</sup> y Rafael Ortega-Paczka<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), Facultad de Ciencias Naturales, Botánica LANIVIG, Querétaro, Querétaro, México. <sup>2</sup>UAQ, Facultad de Ingeniería, Querétaro, Querétaro, México. <sup>3</sup>Universidad Autónoma Chapingo, Dirección de Centros Regionales, Chapingo, Estado de México, México.

\*Autor de correspondencia (luishs@uaq.mx)

### RESUMEN

Conocer la diversidad de razas de maíz (*Zea mays* L. subsp. *mays*) en alguna región o estado y las condiciones ambientales en que prosperan permite disponer de información para la definición de acciones para su conservación y aprovechamiento sostenible. El objetivo del presente estudio fue determinar las razas de maíz que se distribuyen en el estado de Querétaro, México, y caracterizar las condiciones ecogeográficas a las cuales se han adaptado, así como identificar las áreas prioritarias para llevar a cabo colectas de poblaciones nativas de maíz para su conservación *ex situ*. Se recolectaron 110 poblaciones de maíz durante 2021 y 2022 en el sur y norte del estado de Querétaro, México; también se integró una base de datos con los registros históricos disponibles. El total de localidades incluidas en el análisis fue de 261. Se detectó la presencia de 14 razas pertenecientes a cinco grupos raciales, de las cuales cuatro no habían sido previamente reportadas en el estado de Querétaro. El análisis ecogeográfico se llevó a cabo con nueve variables bioclimáticas, edáficas y geofísicas que determinan la distribución del maíz en el estado. Se identificaron 17 categorías, y en 12 de ellas se localizan razas de maíz. Para el resguardo de la representatividad genética se considera prioritaria la colecta en el Altiplano sur por la presencia de categorías ecogeográficas sin registros previos.

**Palabras clave:** *Zea mays* L. subsp. *mays*, bioclimáticas, edáficas, geofísicas, grupo racial.

### SUMMARY

Knowing the diversity of maize (*Zea mays* L. subsp. *mays*) races in a region or state and the environmental conditions in which they thrive, provides information to define actions for their conservation and sustainable use. The objective of this study was to determine the maize races that are distributed in the state of Querétaro, Mexico, and to characterize the ecogeographic conditions to which they have adapted, as well as to identify priority areas for collecting native maize populations for *ex situ* conservation. One hundred and ten accessions were collected during 2021 and 2022 in Southern and Northern Querétaro State, Mexico. A database was constructed with available historical records. The total number of localities included in the analysis was 261 localities. The presence of 14 races belonging to five racial groups was detected, of which four had not been previously reported in the state of Querétaro. The ecogeographic analysis was carried out with nine bioclimatic, edaphic and geophysical variables that determine the distribution of maize in the state. Seventeen categories were identified and 12 of them contain maize races. To safeguard genetic representativeness, collection in the Southern Altiplano is considered a priority due to the presence of ecogeographic

categories without previous records.

**Index words:** *Zea mays* L. subsp. *mays*, bioclimatic, edaphic, geophysical, racial group.

### INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays* L. sub. *mays*) es de los cultivos más importantes, es utilizado para la alimentación humana, forraje para animales y para un extenso número de productos derivados (Tapia *et al.*, 2021). En México el maíz constituye la base del sistema alimentario, desde épocas prehispánicas hasta la actualidad (CONABIO, 2022; González-Martínez *et al.*, 2018). El maíz presenta una amplia diversidad intraespecífica, derivada del tipo de polinización de la especie, del manejo, selección, uso e introducción de variedades externas a sus cultivos por parte de los agricultores, y las diferentes condiciones ambientales en las que se desarrolla (CONABIO, 2022; Dyer *et al.*, 2014); para facilitar su estudio, tal diversidad se agrupa en razas y éstas a su vez en grupos raciales, en función de sus características morfológicas, genéticas, ecológicas, historia evolutiva y distribución geográfica (Orozco-Ramírez *et al.*, 2017; Ortega-Paczka y Mota-Cruz, 2021).

En México el cultivo de maíz se practica desde el nivel del mar hasta más de 3000 msnm, con amplitud de adaptación a temperaturas contrastantes y errática precipitación (Orozco-Ramírez *et al.*, 2017; Ruiz-Corral *et al.*, 2008). En México se tiene el registro de 59 razas, las cuales se han agrupado en siete grupos raciales: Cónico, Sierra de Chihuahua, Ocho Hileras, Chapalote, Tropicales Precoces, Dentados Tropicales y Maduración Tardía (Sánchez *et al.*, 2000). Las razas de maíz se han descrito a partir de un número reducido de colectas contrastantes en sus características, principalmente morfológicas y de adaptación (Sánchez *et al.*, 2000; Wellhausen *et al.*,

1951) y la mayoría de los maíces nativos de México son intermedios entre dos o más razas (CONABIO 2022; Ortega-Paczka y Mota-Cruz, 2021). En el presente estudio el análisis se realizó con las características morfológicas de la raza predominante en los materiales colectados.

La caracterización ecogeográfica del territorio (ELC-Mapas) es un análisis integral de las condiciones abióticas en las cuales se han adaptado las especies en un determinado espacio geográfico. Se consideran variables bioclimáticas, edáficas y geofísicas, que en su conjunto puedan afectar el desarrollo de una planta desde el punto de vista agronómico (Parra *et al.*, 2021; Tapia *et al.*, 2021). La capacidad de los ELC-Mapas de reflejar escenarios adaptativos por especie o grupos de especies permiten que éstos sean utilizados para definir prioridades de colecta, conservación y caracterización de recursos fitogenéticos (Parra-Quijano *et al.*, 2012). En México, Ruiz-Corral *et al.* (2008) y Ruiz *et al.* (2011) llevaron a cabo caracterizaciones agroclimáticas considerando variables de temperatura y precipitación que les permitió determinar las condiciones en las que se han adaptado las razas de maíz. Por su parte, Perales y Golicher (2014) analizaron la distribución del maíz nativo de México en función de las provincias biogeográficas. Si bien dichos estudios permitieron determinar algunos parámetros que influyen en la distribución de las razas de maíz, tienen la limitante de no considerar las variables geofísicas y edáficas; Por el contrario, en Ecuador, Tapia *et al.* (2015) llevaron a cabo una caracterización ecogeográfica considerando 84 variables geográficas (67 climáticas, cinco geofísicas y 12 edáficas) que les permitió identificar material adaptado a condiciones de estrés abiótico como posibles candidatos para programas de mejoramiento genético. Es por ello, que la presente investigación consideró para la caracterización ecogeográfica variables climáticas, edáficas y geofísicas para conocer la aptitud de adaptación de las razas presentes en el estado de Querétaro.

El estado de Querétaro se localiza en la parte central de México, con una amplia heterogeneidad ambiental: altitudes desde los 220 hasta los 3080 msnm, donde se ubican tres provincias biogeográficas: Eje Neovolcánico, Altiplano Sur y la Sierra Madre Oriental (CONABIO, 1997; AGRICULTURA, 2020). El 31 % del suelo de Querétaro está formado por cañadas, llanuras y valles de tierras fértiles, aptos para agricultura y ganadería y el 69 % restante es relieve montañoso (AGRICULTURA, 2020); además, es relevante la presencia de los grupos indígenas Nāñho (otomíes), Xi'ui (pames) y mestizos, los que han generado una amplia diversidad de maíces aún no suficientemente conocida, por lo que los objetivos del presente estudio fueron determinar el número de razas de maíz en el estado de Querétaro, así como las condiciones ecogeográficas

en las cuales están adaptadas y la definición de las áreas prioritarias para colecta dirigida para su conservación *ex situ*.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Colecta y base de datos

Se llevaron a cabo exploraciones para conocer la diversidad de maíces nativos, principalmente en el sur y norte del estado de Querétaro, México durante los años 2021 y 2022, debido a la presencia de grupos indígenas en estos sitios, acopiándose un total de 110 colectas de aproximadamente 10 mazorcas cada una, todas se llevaron a cabo en las casas de los agricultores y se conservan en el Banco de Germoplasma de la Universidad Autónoma de Querétaro (BGUAQ). La identificación racial se realizó con base en las características morfológicas de la mazorca y la opinión de un experto clasificador.

Para el análisis se consideró la raza con mayor predominio, dado que la mayoría de las colectas resultaron con características morfológicas de al menos dos razas, esto se debe al flujo génico de las distintas variedades que aún se cultivan; es decir, no existe una línea divisoria clara entre ellas (Ortega-Paczka y Mota-Cruz 2021; Sánchez *et al.*, 2000); además, para el estudio se adicionó la información de 136 registros de la base de datos publicada por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, 2022) y 62 del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT, 2022). Se evaluó la calidad de georreferenciación de los datos pasaporte con la Herramienta GEOQUAL de Capfitogen3 (Parra *et al.*, 2021). Después de filtrar registros con valores superiores a 70 en la escala de evaluación de 0 a 100 de GEOQUAL, la base de datos final de las razas de maíz para los análisis consistió en 261 registros, incluyendo los registros de las bases de datos de CONABIO y CIMMYT y las colectas de los años 2021 y 2022.

### Distribución de las razas de maíz

La distribución geográfica de las razas de maíz se obtuvo sobre el mapa de división política estatal 1:250000 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (CONABIO, 2019); además, se utilizó la capa de provincias biogeográficas de CONABIO (1997) a una escala de 1:4000000.

### Selección de variables ecogeográficas de importancia

La pre-selección de variables ecogeográficas con alta influencia en la distribución de las razas de maíz se hizo con base en el listado de 179 variables bioclimáticas, edáficas y geofísicas disponibles para el paquete de herramientas

Capfitogen3. La base de datos fue obtenida de Worldclim v2.1 (<https://www.worldclim.org/data/worldclim21.html#>), las variables edáficas provenientes de la base de datos armonizada mundial HWSD v. 1.21 (<https://iiasa.ac.at/web/home/research/researchPrograms/water/HWSD.html>), datos de SoilGrids (<https://soilgrids.org>), y las variables geofísicas de DEM de SRTM (<http://srtm.csi.cgiar.org/>) (Parra *et al.*, 2021). Del listado completo se eliminaron variables no relevantes *a priori*, conforme a una revisión de literatura y a lo observado en las recolecciones en campo. De este proceso de pre-filtrado se seleccionaron 42 variables que corresponden a 15 variables bioclimáticas, 16 variables edáficas relacionadas con la textura del suelo, disponibilidad de nutrientes y pH y 11 variables geofísicas, incluyendo la altitud, pendiente, norticidad, esticidad, velocidad del viento y radiación solar mensual.

Sobrelapre-selección de variables, se aplicó la herramienta SelecVar de Capfitogen3 a manera de proceso objetivo de selección final de variables, con especial relevancia en la conformación de grupos adaptativos de las razas de maíz. Esta herramienta estima la importancia de cada variable acorde al estadístico Mean Decrease in Accuracy (MDA) proveniente de clasificación random forest (Cutler *et al.*, 2007) y posteriormente elimina variables redundantes a través de un análisis de correlación bivariada. SelecVar se configuró de tal forma que por MDA se descarte el 33 % (parámetro  $\text{percenRF} = 0.66$ ) y por alta correlación el 66 % (parámetro  $\text{percenCorr} = 0.33$ ) de las filtradas por MDA. Se instruyó a la herramienta para que seleccionara un mínimo de tres variables ecogeográficas (parámetro  $\text{nminvar} = 3$ ) por cada componente (bioclimático, geofísico y edáfico).

### Caracterización ecogeográfica del terreno (ELC-Mapas)

Para la obtención de mapas de caracterización ecogeográfica del territorio (ELC) se utilizaron las nueve variables seleccionadas desde SelecVar (ver arriba). Se utilizó la herramienta ELCmapas de Capfitogen3, con una configuración de parámetros para producir un mapa ráster para México de un tamaño de celda de 2.5 arc.minutos, con el método Bayesian Information Criterion (Fraley y Raftery, 2007) y un número máximo de agrupamientos por componente ecogeográfico de ocho, conforme a las condiciones de heterogeneidad ambiental y fisiográfica donde se distribuyen las razas de maíz. Con la finalidad de identificar las diferentes categorías ecogeográficas donde se localizan las razas de maíz. Finalmente, para describir la asociación de las nueve variables con la riqueza racial que se encuentra en Querétaro, se llevó a cabo un análisis multivariado de componentes principales. Para la obtención de los mapas se utilizó QGIS ver 3.16 y el análisis estadístico en R ver. 4.1.3.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Distribución de las razas de maíz

En total, para el estado de Querétaro se registraron 14 razas de maíz nativo que pertenecen a cinco grupos raciales: Cónico, Ocho Hileras, Dentados Tropicales, Tropicales Precoces y Maduración Tardía, de las cuales 10 razas ya estaban consideradas en los registros históricos de CONABIO y CIMMYT; no obstante, con las nuevas colectas de 2021 y 2022 se identificaron cuatro razas adicionales localizadas en la parte norte del estado (Cuadro 1, Figura 1), estas últimas corresponden a las razas Blando, Bolita, Harinoso de Ocho y Tabloncillo.

Del grupo Cónico se localizaron cinco razas en el estado: Chalqueño, Cónico, Elotes Cónicos, Mushito y Cónico Norteño (Cuadro 1), las cuales se localizan principalmente hacia el sur del estado en el municipio de Amealco, que corresponde a la provincia biogeográfica del Eje Neovolcánico. Otro grupo racial presente en el estado fue Ocho Hileras con cinco razas: Blando, Bolita, Harinoso de Ocho, Elotes Occidentales y Tabloncillo, distribuidas principalmente en el norte del estado. Destaca que de estas últimas cinco razas no se tenían registros previos para el estado de Querétaro y corresponden a razas que se localizan principalmente al occidente del país (CONABIO, 2022; Perales y Golicher, 2014). El grupo de los Dentados Tropicales en el estado de Querétaro está representado por dos razas: Tuxpeño y Celaya. Del grupo de los Tropicales Precoces sólo se registró la raza Ratón en la parte norte del estado y el grupo racial de Maduración Tardía también estuvo representado por una accesión que corresponde a la raza Olotillo, estos últimos localizados principalmente en la Sierra Madre Oriental (Cuadro 1, Figura 1).

### Variables ecogeográficas que determinan la distribución de las razas de maíz

De un total de 42 variables bioclimáticas, edáficas y geofísicas utilizadas para el análisis, la distribución de las razas nativas en Querétaro, México, conforme a la herramienta SelecVar de Capfitogen3, está determinada por nueve variables, las cuales fueron utilizadas para la caracterización ecogeográfica; de éstas, tres fueron bioclimáticas: promedio de la temperatura del cuarto más cálido (BIO 10), promedio de temperatura del cuarto más frío (BIO 11), promedio de precipitación del cuarto más húmedo (BIO 16). Las variables edáficas fueron: capacidad de intercambio catiónico ( $t_{\text{cecsol}}$ ), cantidad de carbono orgánico disponible ( $t_{\text{oc\_dens}}$ ) y pH en KCl del suelo ( $t_{\text{ph\_kcl}}$ ) y las geofísicas fueron: altitud (alt), promedio de viento anual ( $\text{wind\_annual}$ ) y radiación solar del mes de mayo ( $\text{srad}_5$ ) (Figura 2, Cuadro 2). Acorde con lo encontrado en

Cuadro 1. Grupos raciales y razas registradas en el estado de Querétaro, México.

Grupo racial				
Cónico	Ocho Hileras	Dentados Tropicales	Tropicales Precoces	Maduración Tardía
Cónico	Blando <sup>+</sup>	Celaya	Ratón	Olotillo
Cónico Norteño	Bolita <sup>+</sup>	Tuxpeño		
Chalqueño	Elotes Occidentales			
Elotes Cónicos	Harinoso de Ocho <sup>+</sup>			
Mushito	Tabloncillo <sup>+</sup>			

<sup>+</sup>Corresponde a nuevos registros para el estado de Querétaro identificados con las colectas del año 2021 y 2022.

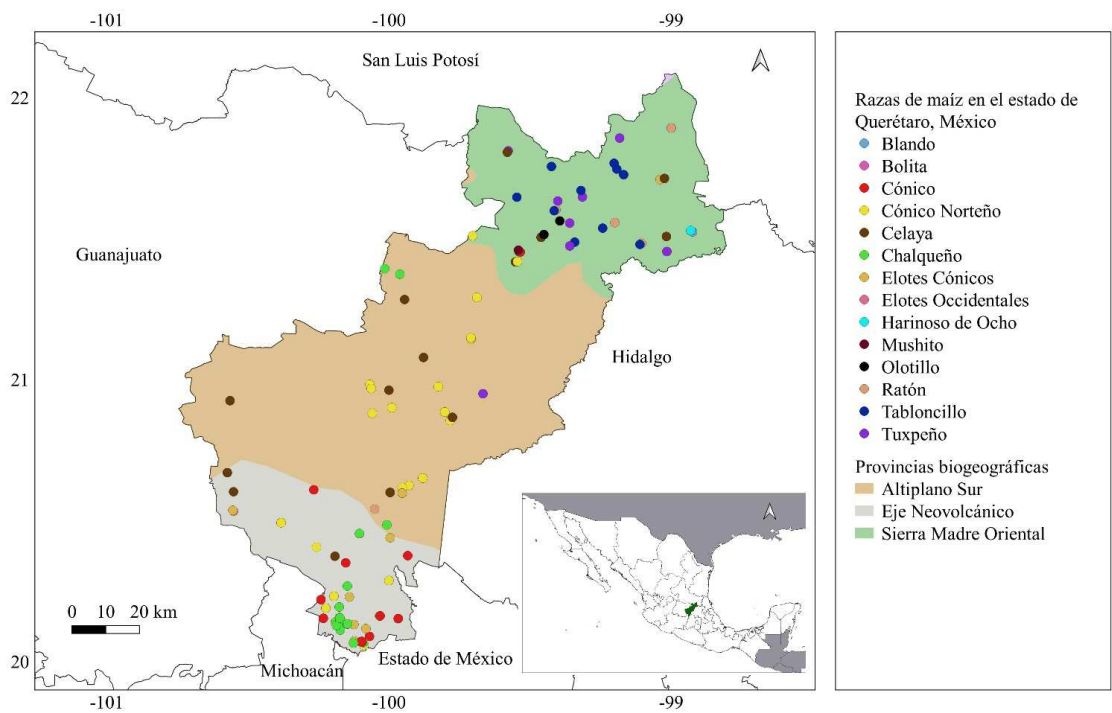


Figura 1. Distribución de las 14 razas de maíz nativo presentes en el estado de Querétaro, México.

los estudios de Ruíz-Corral *et al.* (2008) y Gao *et al.* (2021), quienes señalaron que las variables que determinan la distribución en maíz son principalmente la temperatura, precipitación, textura, pH del suelo y altitud.

En el análisis de componentes principales se observó que los componentes 1 y 2 suman el 85.2 % de la varianza total. Las variables con mayor contribución al componente 1 fueron: BIO 10, BIO 11, *t\_cecsol*, *t\_oc\_dens*, Alt, *wind\_annual* y *srad\_5*. Al componente 2 contribuyeron mayormente: BIO 16 y *t\_ph\_kcl*. En la Figura 2, se observa que el grupo racial Cónico se asocia con variables bioclimáticas y geofísicas:

Alt, *wind\_annual* y *srad\_5* y BIO 16; por el contrario, los grupos raciales Dentados Tropicales y Ocho Hileras por las características edáficas como: *t\_cecsol* y *t\_oc\_dens*; no obstante, hay colectas y registros de los cinco grupos raciales definidos por las variables: BIO 11, BIO 10, *srad\_5* y el *t\_ph\_kcl*.

Caracterización ecogeográfica del terreno (ELC-Mapas)

Con las nueve variables que determinan la distribución de maíz en el análisis de caracterización ecogeográfica se obtuvieron 17 categorías, pero sólo se tienen registros



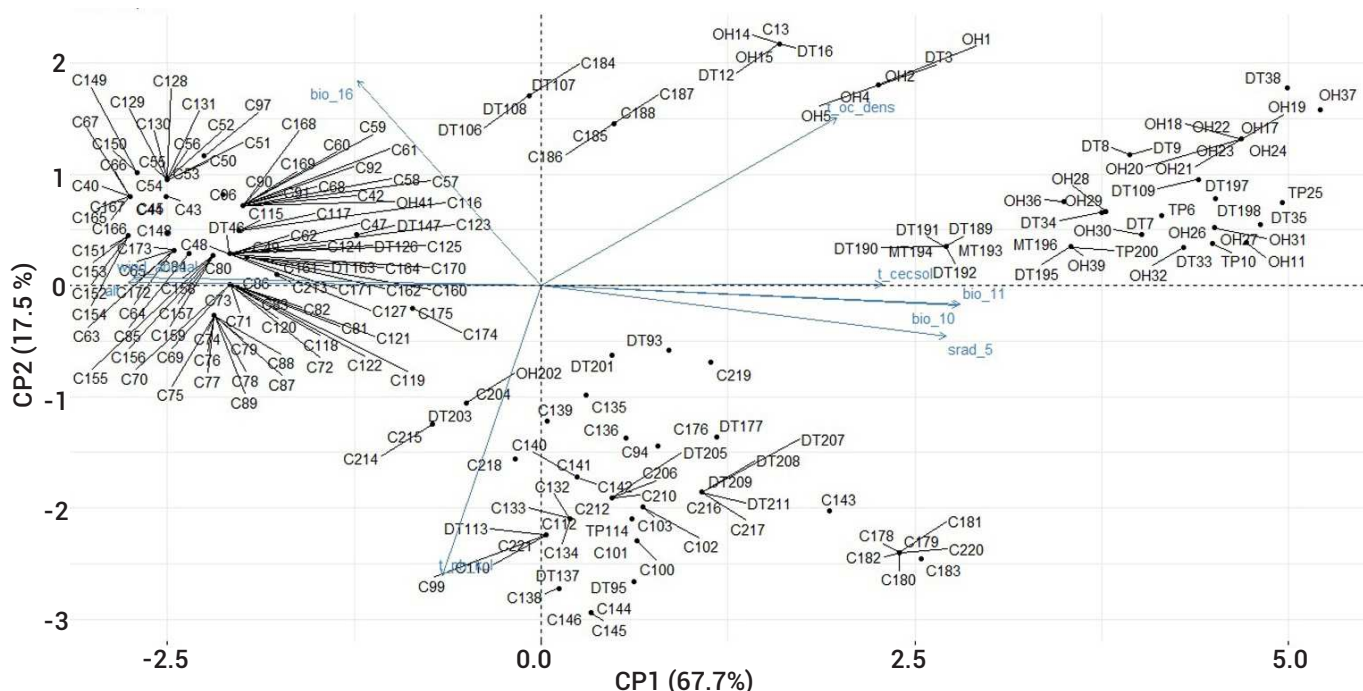


Figura 2. Análisis de componentes principales con base en las nueve variables más importantes que determinan la distribución de cinco grupos raciales de Querétaro: C (Cónico), OH (Ocho Hileras), DT (Dentados Tropicales), TP (Tropicales Precoces) y MT (Maduración Tardía).

en 12. Las categorías sin localidades son: 1, 2, 10, 12 y 16 (Figura 3), las cuales, de cultivarse maíz en ellas, resultarían ser áreas prioritarias para realizar colectas dirigidas que permitiría tener la representatividad de las diferentes condiciones ecogeográficas en las que se encuentra el maíz nativo en el estado; además, existen categorías con una amplia área, pero con pocos registros como la 5, 9 y 15, que se requieren muestrear (Figura 3); sin embargo, es probable que por las condiciones bioclimáticas, geofísicas y edáficas no se cultive maíz.

En las 12 categorías ecogeográficas en las que se localizan las 14 razas de maíz, las nueve variables presentan un coeficiente de variación menor de 50 %, lo que indica que las condiciones son relativamente homogéneas para las nueve variables señaladas. Destaca la presencia solo de la raza Mushito en la categoría ecogeográfica 7 y de Cónico Norteño en la 9, ambas ubicadas en la zona de Transición entre el Altiplano Sur y la Sierra Madre Oriental. La categoría ecogeográfica 7 presenta los valores más bajos de BIO 10 y BIO 11 con 14 y 10 °C, con un promedio de precipitación de 630 mm y altitud con 2980 msnm; por el contrario, la categoría 9 tiene un promedio de BIO 10 de 24 °C, BIO 11 de 16 °C y una precipitación de 244 mm (cv: 24 %) (Cuadro 2). Dadas las condiciones del estado de Querétaro con una proporción significativa del territorio con bajas

precipitaciones, las razas Cónico Norteño y Ratón, presentes en Querétaro (Cuadro 1), representan alternativas para los agricultores bajo condiciones de limitada precipitación y temperaturas extremas de las zonas semiáridas del Altiplano Sur (CONABIO, 2022; Rincón *et al.*, 2010).

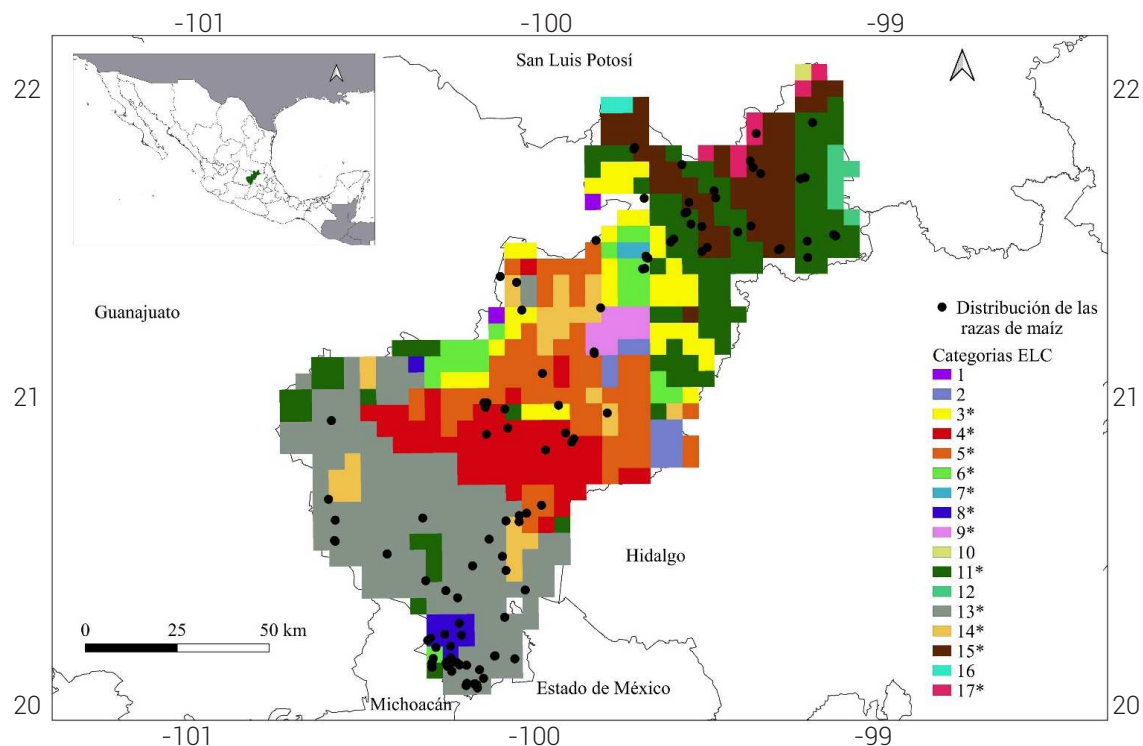
Las otras razas del grupo racial Cónico se localizan en la mayoría de las categorías ecogeográficas, pero con una marcada preferencia por la 13, la cual presentó los niveles más bajos de  $t_{oc\_dens}$  con un promedio de 109 cmolc/kg y una altitud de 2014 msnm (cv: 22 %) (Cuadro 2), lo que coincide con lo señalado por Sánchez *et al.* (2000), quienes las ubicaron en altitudes de más de 2000 msnm, principalmente en los valles altos y sierras del centro del país. De hecho, se considera que las razas de este grupo racial presentan resistencia a la sequía en etapas medias de crecimiento y tolerancia al frío (CONABIO, 2022; Herrera-Cabrera *et al.*, 2004); por el contrario, el grupo racial de ocho hileras se localiza principalmente en las categorías ecogeográficas del norte del estado (Cuadro 2, Figura 3).

El grupo de los Dentados Tropicales (Tuxpeño y Celaya) se localiza en las categorías ecogeográficas 3, 4, 5, 6, 11, 13, 14, 15 y 17. En el caso de la raza Tuxpeño, se localiza en la categoría 17 que presenta los valores más bajos de altitud, wind<sub>annual</sub>, pH, pero los más altos en srad<sub>5</sub> (Cuadro 2).

**Cuadro 2. Valores de las nueve variables por categoría ecogeográfica en donde se localizan las razas de maíz nativas. Se indica el promedio y entre paréntesis el coeficiente de variación (%).**

Categoría ELC-Mapas	Raza <sup>†</sup>	Bioclimáticas <sup>††</sup>			Geofísicas <sup>††</sup>			Edáficas <sup>††</sup>		
		BIO 10 (°C)	BIO 11 (°C)	BIO 16 (mm)	Alt (msnm)	wind_ annual (m/s)	srad_5 (W/ m <sup>2</sup> )	t_cecsol (cmolc/ kg)	t_oc_dens (kg.m <sup>3</sup> )	t_ph_kcl
3	2, 11	20(6)	13(5)	229(12)	2019(15)	2.89(24)	20609(2)	27 (7)	156(10)	5(3.7)
4	1, 2, 4, 11	19(5)	13(7)	255(21)	2125 (8)	2.55(13)	20215(1)	22(18)	110(13)	6(3.3)
5	1, 2, 4, 11	20(6)	13 (5)	209(18)	2009(11)	3.17(15)	20349(2)	23(11)	125(18)	7(4.6)
6	1, 2, 3, 4, 11	16(7)	11(6)	557(19)	2585(11)	2.64(8)	19037 (4)	26(12)	169(14)	5 (4.0)
7	5	14(7)	10 (5)	630(11)	2980(11)	2.87(12)	18274 (2)	26(10)	236(15)	5(2.1)
8	1, 2, 3, 4, 8	18(8)	12(6)	517(20)	2361(16)	2.68(6)	20030 (4)	22(6)	118(5)	5(1.9)
9	2	24(4)	16(7)	244(24)	1319(16)	2.40(19)	21218 (2)	25(9)	141(16)	6(4.8)
11	1, 3, 4, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14	20(5)	14(12)	501(29)	1990(15)	2.25(25)	19880(3)	27(9)	143(14)	5(3.8)
13	1, 2, 3, 4, 8, 11, 13	19(7)	13(8)	431 (20)	2014(22)	2.21(16)	19954(1)	25(15)	109(11)	6(3.5)
14	12, 3, 2, 4	20(5)	13(7)	309 (20)	1976(18)	2.64(29)	20187(2)	23(10)	119(21)	6(3.2)
15	8, 10, 11, 12, 13	25(5)	17(6)	525 (32)	984(30)	1.83(17)	21261(3)	27(9)	154(14)	5(3.9)
17	12	27(2)	17(7)	549 (31)	523(43)	1.79(19)	21933(3)	28(8)	157(16)	5(1.9)

<sup>†</sup>Las razas de maíz se indican conforme a la siguiente numeración: 1. Cónico, 2. Cónico Norteno, 3. Chalqueño, 4. Elotes Cónicos, 5. Mushito, 6. Blando, 7. Bolita, 8. Elotes Occidentales, 9. Harinoso de Ocho, 10. Tabloncillo, 11. Celaya, 12. Tuxpeño, 13. Ratón y 14. Olotillo. <sup>††</sup>Las variables son: BIO 10: temperatura promedio del cuarto más cálido, BIO 11: temperatura promedio del cuarto más frío, BIO 16: promedio de la precipitación del cuarto más húmedo, Alt: altitud, wind\_annual: velocidad del viento anual, srad\_5: radiación solar en mayo, t\_cecsol: capacidad de intercambio catiónico en el suelo, t\_oc\_dens: densidad de carbono orgánico, t\_ph\_kcl: pH del suelo en KCl.



**Figura 3.** Mapa de caracterización ecogeográfica en función de nueve variables bioclimáticas, edáficas y geofísicas en el estado de Querétaro, México. \*Indica la presencia de registro de razas de maíz.

De hecho, González *et al.* (2013) lo consideran un grupo de regiones intermedias y de baja altitud. En el caso de Tuxpeño, se trata de una raza de amplia distribución en México, adaptada a diferentes condiciones bioclimáticas, edáficas y geofísicas (CONABIO, 2022).

La raza Ratón es única en el grupo de los Tropicales Precoces y se encuentra solamente en las categorías ecogeográficas 11, 13 y 15 (Cuadro 2), las cuales están ubicadas en altitudes de 984 a 2014 msnm, contrario a lo señalado por Rincón *et al.* (2010) de que la raza se localiza en zonas bajas e intermedias de 100 a 1300 msnm, adaptada a limitados regímenes de lluvia, lo que le confiere un ciclo de maduración corto y se encuentran principalmente en trópicos secos y regiones semiáridas del país; sin embargo, es probable que su presencia en climas templados, como en la categoría 13, se deba al intercambio que llevan a cabo los agricultores. La raza Olotillo, única presente del grupo racial de Maduración Tardía, sólo se identificó en la categoría 11, ubicada al norte del estado de Querétaro. Bellon y Risopolous (2001) señalaron que la raza se adapta principalmente al trópico húmedo y seco, se produce bajo condiciones edáficas limitantes, suelos someros y bajo uso de insumos.

## CONCLUSIONES

En el estado de Querétaro se encuentran 14 razas de maíz que corresponden a Cónico, Cónico Norteño, Chalqueño, Elotes Cónicos, Mushito, Blando, Bolita, Elotes Occidentales, Harinoso de Ocho, Tabloncillo, Celaya, Tuxpeño, Ratón y Olotillo. Los dos grupos raciales con más razas presentan una distribución ecogeográfica diferente. Las razas del grupo Cónico se ubican en la región templada al sur del estado y las del grupo racial de Ocho Hileras en diferentes categorías ecogeográficas en la Sierra Madre Oriental. Destaca la presencia de las razas Ratón y Cónico Norteño adaptadas a las condiciones del semidesierto. El estado de Querétaro, México tiene un acervo genético de maíz nativo adaptado a 12 diferentes categorías ecogeográficas. Se considera que el área prioritaria para la colecta dirigida para la conservación *ex situ* es la provincia biogeográfica del Altiplano Sur, por la presencia de categorías ecogeográficas sin registros previos.

## AGRADECIMIENTOS

A la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) con el proyecto con clave RG057 y la Universidad Autónoma de Querétaro con el proyecto FONDEC-2021 por el financiamiento para las colectas. A

los agricultores que compartieron información y donaron mazorcas para la investigación.

## BIBLIOGRAFÍA

- AGRICULTURA, Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (2020) Programa de Concurrencias en la Entidades Federativas. Compendio de Indicadores Estatales 2018. Querétaro. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Ciudad de México. 95 p.
- Bellon M. R. and J. Risopoulous (2001) Small-scale farmers expand the benefits of improved maize germplasm: a case study from Chiapas, México. *World Development* 29:799-811, [https://doi.org/10.1016/S0305-750X\(01\)00013-4](https://doi.org/10.1016/S0305-750X(01)00013-4)
- CIMMYT, International Maize and Wheat Improvement Center (2022) CIMMYT-Maize Germplasm Bank. Texcoco, State of Mexico. <https://mgb.cimmyt.org/gringlobal/search> (July 2022).
- CONABIO, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (1997) Provincias biogeográficas de México, escala 1:4000000. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Ciudad de México. <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/rbiog4mgw.html> (Noviembre 2022).
- CONABIO, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (2019) División política estatal 1:250000. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Ciudad de México. <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/dest2019gw.html> (Noviembre 2023).
- CONABIO, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (2022) Razas de maíz de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Ciudad de México. <https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/alimentos/maices/razas-de-maiz> (Junio 2022).
- Cutler D. R., T. C. Edwards Jr., K. H. Beard, A. Cutler, K. T. Hess, J. Gibson and J. J. Lawler (2007) Random forests for classification in ecology. *Ecology* 88:2783-2792, <https://doi.org/10.1890/07-0539.1>
- Dyer G. A., A. López-Feldman, A. Yúnez-Naude and J. E. Taylor (2014) Genetic erosion in maize's center of origin. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 111:14094-14099, <https://doi.org/10.1073/pnas.1407033111>
- Fraley C. and A. E. Raftery (2007) Bayesian regularization for normal mixture estimation and model-based clustering. *Journal of Classification* 24:155-181, <https://doi.org/10.1007/s00357-007-0004-5>
- Gao Y., P. Su, A. Zhang, R. Wang and J. Wang (2021) Dynamic assessment of global maize exposure to extremely high temperatures. *International Journal of Disaster Risk Science* 12:713-730, <https://doi.org/10.1007/s13753-021-00360-8>
- González C. M. E., N. Palacios R., A. Espinoza B. y C. A. Bedoya S. (2013) Diversidad genética de maíces nativos tropicales. *Revista Fitotecnica Mexicana* 36:329-338, <https://doi.org/10.35196/rfm.2013.3-S3-A.329>
- González-Martínez J., M. Rocandio-Rodríguez, J. C. Chacón-Hernández, V. Vanoye-Eligio y Y. R. Moreno-Ramírez (2018) Distribución y diversidad de maíces nativos (*Zea mays* L.) en el altiplano de Tamaulipas, México. *Agroproductividad* 11:124-130.
- Herrera-Cabrera B. E., F. Castillo-González, J. J. Sánchez-González, J. M. Hernández-Casillas, R. Ortega-Pazcka y M. M. Goodman (2004) Diversidad del maíz Chalqueño. *Agrociencia* 38:191-206.
- Orozco-Ramírez Q., H. Perales and R. J. Hijmans (2017) Geographical distribution and diversity of maize (*Zea mays* L. subsp. *mays*) races in Mexico. *Genetic Resources and Crop Evolution* 64:855-865, <https://doi.org/10.1007/s10722-016-0405-0>
- Ortega-Pazcka R. y C. Mota-Cruz (2021) Razas de maíz de México: Concepto, diversidad, importancia y conservación. In: Milpa. Pueblos de Maíz: Diversidad y Patrimonio Biocultural de México. Secretaría de Cultura, Instituto Nacional de Antropología e Historia y Gobierno del Estado de México. Ciudad de México. pp:89-117.
- Parra Q. M., J. M. Iriondo, M. E. Torres, F. López, J. Phillips y S. Kell (2021) Capfitogen3: Una Caja de Herramientas para la Conservación y Promoción del Uso de la Biodiversidad Agrícola. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. 311 p.
- Parra-Quijano M., J. M. Iriondo and E. Torres (2012) Ecogeographical land characterization maps as a tool for assessing plant adaptation and their implications in agrobiodiversity studies. *Genetic Resources and Crop Evolution* 59:205-217, <https://doi.org/10.1007/s10722-011-9676-7>
- Perales H. and D. Golicher (2014) Mapping the diversity of maize races in Mexico. *PLoS ONE* 9:e114657, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0114657>
- Rincón S. F., F. Castillo G. y N. A. Ruiz T. (2010) Diversidad y Distribución de los Maíces Nativos en Coahuila. Sociedad Mexicana de Fitogenética, A. C. Chapingo, México. 116 p.
- Ruiz C. J. A., J. L. Ramírez D., J. M. Hernández C., F. Aragón C., J. J. Sánchez G., A. Ortega C., ... y G. Ramírez O. (2011) Razas de maíz como fuente de germoplasma para la adaptación al cambio climático. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* Pub. Esp. 2:293-307.
- Ruiz-Corral J. A., N. Durán P., J. J. Sánchez G., J. Ron P., D. R. González E., J. B. Holland and G. Medina G. (2008) Climatic adaptation and ecological descriptors of 42 Mexican maize races. *Crop Science* 48:1502-1512, <https://doi.org/10.2135/cropsci2007.09.0518>
- Sánchez J. J., M. M. Goodman and C. W. Stuber (2000) Isozymatic and morphological diversity in the races of maize of Mexico. *Economic Botany* 54:43-59, <https://doi.org/10.1007/BF02866599>
- Tapia C., E. Torres and M. Parra-Quijano (2015) Searching for adaptation to abiotic stress: ecogeographical analysis of highland Ecuadorian maize. *Crop Science* 55:262-274, <https://doi.org/10.2135/cropsci2013.12.0813>
- Tapia C., E. Torres, N. Paredes and M. Parra-Quijano (2021) Morphological and ecogeographical diversity analysis of maize germplasm in the high altitude Andes region of Ecuador. *Plant Genetic Resources: Characterization and Utilization* 19:183-194, <https://doi.org/10.1017/S1479262121000125>
- Wellhausen E. J., L. M. Roberts y E. Hernández X. (1951) Razas de maíz en México, su origen, características y distribución. Folleto Técnico No. 5. Oficina de Estudios Especiales, Secretaría de Agricultura y Ganadería. México, D. F. 273 p.