

## CONECTIVIDAD ESTRUCTURAL DE ANFIBIOS EN LA FAJA VOLCÁNICA TRANSMEXICANA

Bruno Damián Aguirre del Villar

### Introducción.

La composición geomorfológica aunada a la misma historia geológica que tiene el territorio Mexicano es sumamente compleja, contando con un abanico de características fisiográficas en un espacio relativamente pequeño, mismo que le confiere una gran biodiversidad alrededor de todo el país (Aguayo-Camargo y Córdova, 1987). Una de las regiones más importantes de México es la Faja Volcánica Transmexicana (FVT), provincia que conecta la región oriental con la occidental, caracterizada principalmente por cordilleras volcánicas que abarcan desde el estado de Nayarit hasta Veracruz. La importancia del FVT se da específicamente por su valor ecológico y biológico: La distribución de vegetación y diferencias altitudinales son características importantes que determinan la alta biodiversidad que se puede encontrar en la región (Gámez *et al.*, 2012). Lamentablemente, el FVT es una de las zonas más perjudicadas ecológicamente, especialmente por actividades antropogénicas (i.e. urbanización, agricultura; Gonzáles-Fernandes *et al.*, 2018; Sunny *et al.*, 2017), y tomando en cuenta el efecto que tiene en las relaciones parasíticas de la herpetofauna el cambio climático (CC) (Cohen *et al.*, 2019), la amplia riqueza y abundancia que se encuentra a lo largo del FTV (Cruz-Sáenz *et al.*, 2017; Woolrich-Piña *et al.*, 2016; Woolrich-Piña *et al.*, 2017) se ve frente a una gran amenaza, misma que requiere de esfuerzos en investigación y conservación para poder ser mitigada (Howell *et al.*, 2020).

Los modelos de idoneidad del hábitat (MDH) derivan la relación entre la ubicación geográfica y los factores ambientales que se encuentran en los puntos de ocurrencia de determinada especie, prediciendo la probabilidad de distribución que puede tener dicha especie bajo otras condiciones ambientales, proyectada a un espacio temporal y/o geográfico distinto (Hirzel y Le Lay, 2008). Gracias a esto los MDH han cobrado relevancia en temas como la evaluación de riesgo de especies invasoras, la delimitación de áreas de conservación y sobre todo el estudio del impacto del CC sobre la biota (Guisan y Thuiller, 2005). El cambio climático juega un papel importante en la ecología de distintas especies, ya que (entre otras cosas) está alterando los patrones de distribución de numerosas poblaciones, por lo que el uso de los MDH resulta de suma importancia para poder evaluar y, así, agilizar la toma de decisiones que lleven a la prevención y moderación de las consecuencias ambientales que pueden sufrir (Brown *et al.*, 2016)

Los anfibios (clasificados en los clados Gymnophiona, Caudata y Anuros; cecilias, salamandras y sapos, respectivamente) es un grupo que muestra resiliencia a largo plazo frente a fluctuaciones ambientales, observando a nivel de abundancia una oscilación drástica en diferentes estaciones del año, pero persistente en escalas de tiempo amplias. Esta resiliencia se da gracias a diversos factores fisiológicos atinentes a los anfibios (como la ectotermia), mismas características que pueden explicar la amplia distribución del grupo, además de que puedan vivir en zonas fuera de su distribución normal (Vitt y Caldwell, 2013).

A pesar de esto, es importante mencionar el efecto que tienen las perturbaciones sobre la abundancia y distribución para los anfibios causadas por elementos antrópicos, como el CC (Cohen *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2020).

La distribución de los anfibios a nivel mundial se da, mayormente, en la ecoregión del neotrópico (parte sur de Norteamérica, Centroamérica y Sudamérica) y en gran parte de África y Oriente. Se estipula que los patrones de distribución de estos animales no tienen correlación con el tamaño de los continentes. Por otro lado, la configuración geomorfológica juega un papel en cuanto respecto a endemismos y riqueza: Existe mayor riqueza en las tierras bajas, mientras que en zonas montañosas hay más endemismo (Duellman, 1999; Vitt y Caldwell, 2013).

Por estas razones el presente trabajo tuvo como objetivo generar los modelos de distribución potencial al presente y al futuro de los anfibios para poder entender la configuración en el espacio de la herpetofauna en la FVT bajo condiciones ambientales actuales y a futuro bajo escenarios de CC para posteriormente ser usados en modelos de conectividad.

## **Materiales y métodos.**

### Búsqueda bibliográfica.

Se realizó una revisión bibliográfica para la búsqueda de información genética y espacial (datos de ocurrencias) de anfibios en el FVT, teniendo como criterio a las palabras clave: “Phylogeography”, “Transmexican Volcanic Belt”, “DNAm”. Se utilizaron como motores de búsqueda la Biblioteca Digital (bidi) de la UNAM, Google Académico, las bases de datos Web of Science, Redalyc, SciELO y Dialnet.

### Datos de ocurrencia.

Los datos de presencia se cotejaron usando las bases de datos GBIF (<https://www.gbif.org/>) y de literatura competente. Se obtuvieron las capas ambientales con datos actuales y de predicción a futuro bajo condiciones de cambio climático (CC) a través de WorldClim (<https://www.worldclim.org/>) y CHELSA (capas ambientales registradas a 30 segundos: <https://chelsa-climate.org/>), comparando la información con los datos de superficies climáticas de México de la UAEM (<http://idrisi.uaemex.mx/distribucion/superficies-climaticas-para-mexico>).

### Variables ambientales

Las capas ambientales utilizadas para el modelo de nicho ecológico al presente corresponden a datos obtenidos en el rango temporal de 1981-2010 (CHELSA\_1981-2010\_V.2.1). Los datos al futuro contienen la predicción para el rango de 2041-2070 utilizando el escenario predicho para las trayectorias socioeconómicas compartidas (SSP) de tipo 3 y para las trayectorias de concentración compartida (RCP) de tipo 7 (CHELSA\_2041-2070\_ipsl-cm6a-lr\_ssp370\_V.2.1).

Las variables ambientales con las que se entrenó a los modelos se obtuvieron del trabajo de Karger *et al.* (2017), siendo las siguientes:

Bio1 = Temperatura media anual [ $^{\circ}\text{C} * 10$ ]  
Bio2 = Rango medio diario [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
Bio3 = Isotermalidad  
Bio4 = Temporalidad de la temperatura [desviación estándar]  
Bio5 = Temperatura máxima del mes más caliente [ $^{\circ}\text{C} * 10$ ]  
Bio6 = Temperatura media del mes más frío [ $^{\circ}\text{C} * 10$ ]  
Bio7 = Rango anual de la temperatura [ $^{\circ}\text{C} * 10$ ]  
Bio8 = Temperatura media del cuarto más frío [ $^{\circ}\text{C} * 10$ ]  
Bio9 = Temperatura media del cuarto más seco [ $^{\circ}\text{C} * 10$ ]  
Bio10 = Temperatura media del cuarto más cálido [ $^{\circ}\text{C} * 10$ ]  
Bio11 = Temperatura media del cuarto más frío [ $^{\circ}\text{C} * 10$ ]  
Bio12 = Precipitación anual [mm/año]  
Bio13 = Precipitación del mes más húmedo [mm/mes]  
Bio14 = Precipitación del mes más seco [mm/mes]  
Bio15 = Temporalidad de la precipitación [coeficiente de variación]  
Bio16 = Precipitación del cuarto más húmedo [mm/cuarto]  
Bio17 = Precipitación del cuarto más seco [mm/cuarto]  
Bio18 = Precipitación del cuarto más cálido [mm/cuarto]  
Bio19 = Precipitación del cuarto más frío [mm/cuarto]

#### Modelado de distribución potencial.

Los modelos de nicho se realizaron con el algoritmo MaxEnt (maximum entropy), utilizando la aplicación Java del mismo nombre y el lenguaje de programación R, con sus respectivas librerías (repositorio de GitHub: Aguirre del Villar, 2022). Para las características del modelo, se utilizaron las opciones lineales y cuadráticas; a su vez, se aplicó jackknife para corregir las estimaciones. Los valores de la probabilidad de Gibbs fueron transformados por métodos logarítmicos, mientras que el modelo fue ajustado con un valor de multiplicador beta de 0.3. Los resultados fueron analizados con validación cruzada. Se calcularon los umbrales de selección binaria (presencia - ausencia) utilizando la media de la suma del máximo de las tasas de los valores positivos verdaderos y máximos negativos verdaderos, por especie. Por otro lado, para determinar la diferencia entre las áreas de distribución de proyecciones de los modelos (para las capas ambientales del presente y del futuro, con CC) por especie se realizó una prueba de U de Mann Whitney.

**Tabla 1.** Número de ocurrencias para cada una de las especies de anfibios en la FVT.

Especie	Ocurrencias	Referencia
<i>Dryophytes arenicolor</i>	11	Klymus y Herhardt, 2012
<i>Dryophytes arenicolor</i>	8	Quezada-Hipolito <i>et al.</i> , 2019
<i>Dryophytes eximius</i>	6	Quezada-Hipolito <i>et al.</i> , 2019
<i>Eleutherodactylus nitidus</i>	7	Quezada-Hipolito <i>et al.</i> , 2019
<i>Hypopachus variolosus</i>	4	Quezada-Hipolito <i>et al.</i> , 2019
<i>Incilius marmoreus</i>	1	Quezada-Hipolito <i>et al.</i> , 2019
<i>Incilius mazatlanensis</i>	1	Quezada-Hipolito <i>et al.</i> , 2019
<i>Incilius occidentalis</i>	5	Quezada-Hipolito <i>et al.</i> , 2019
<i>Incilius valliceps</i>	1	Quezada-Hipolito <i>et al.</i> , 2019
<i>Isthmura bellii</i>	6	Quezada-Hipolito <i>et al.</i> , 2019
<i>Lithobates catesbeianus</i>	1	Quezada-Hipolito <i>et al.</i> , 2019
<i>Lithobates forreri</i>	2	Quezada-Hipolito <i>et al.</i> , 2019
<i>Lithobates neovolcanicus</i>	4	Quezada-Hipolito <i>et al.</i> , 2019

**Tabla 2.** Se muestra las especies que se realizaron modelos de distribución de nicho y los valores de AUC (área bajo la curva) para la evaluación del rendimiento de los modelos.

Especie	AUC	AUC
	Entrenamiento	Prueba
<i>Dermophis oaxacae</i>	0.968006	0.969349
<i>Dryophytes arenicolor</i>	0.838515	0.832999
<i>Dryophytes euphorbiaceus</i>	0.967431	0.962626
<i>Dryophytes eximius</i>	0.885058	0.896975
<i>Dryophytes plicatus</i>	0.986951	0.976627
<i>Dryophytes wrightorum</i>	0.978122	0.992544
<i>Duellmanohyla ignicolor</i>	0.973417	0.937805
<i>Eleutherodactylus albolabris</i>	0.922055	0.816643
<i>Eleutherodactylus angustidigitum</i>	0.988437	0.987697
<i>Eleutherodactylus guttilatus</i>	0.945499	0.964079
<i>Eleutherodactylus modestus</i>	0.975453	0.977537
<i>Eleutherodactylus nitidus</i>	0.936042	0.920078
<i>Eleutherodactylus pipilans</i>	0.958397	0.959162
<i>Eleutherodactylus rufescens</i>	0.999716	0.999817
<i>Exerodonta smaragdina</i>	0.957506	0.939073
<i>Exerodonta sumichrasti</i>	0.957755	0.961426
<i>Exerodonta xera</i>	0.99208	0.999438
<i>Hyalinobatrachium fleischmanni</i>	0.977714	0.963714
<i>Hypopachus ustus</i>	0.944582	0.95163
<i>Hypopachus variolosus</i>	0.857958	0.85108
<i>Incilius cristatus</i>	0.955431	0.931689
<i>Incilius marmoratus</i>	0.937799	0.945247
<i>Incilius mazatlanensis</i>	0.958299	0.959312
<i>Incilius mocoqui</i>	0.907026	0.877976
<i>Incilius occidentalis</i>	0.88011	0.86971
<i>Incilius perplexus</i>	0.966638	0.958028
<i>Incilius valliceps</i>	0.889828	0.887703
<i>Isthmura bellii</i>	0.929878	0.912077
<i>Isthmura gigantea</i>	0.997361	0.880009
<i>Leptodactylus fragilis</i>	0.925307	0.933839
<i>Leptodactylus melanonotus</i>	0.878461	0.889574
<i>Leptodactylus mystacinus</i>	0.908011	0.898231
<i>Lithobates berlandieri</i>	0.799507	0.79669
<i>Lithobates catesbeianus</i>	0.75467	0.721436
<i>Lithobates dunni</i>	0.993397	0.976749
<i>Lithobates forreri</i>	0.853414	0.832339
<i>Lithobates magnaocularis</i>	0.930092	0.921408
<i>Lithobates megapoda</i>	0.972022	0.952296
<i>Lithobates montezumae</i>	0.939913	0.94337
<i>Lithobates neovolcanicus</i>	0.958379	0.957608

## Resultados y discusión

La búsqueda bibliográfica con las palabras clave arrojó un total de dos artículos con información pertinente a puntos de ocurrencia de anfibios en la Faja Volcánica Transmexicana (FVT) (Klymus y Herhardt, 2012; Quezada-Hipólito *et al.*, 2019). Estos trabajos reportan los puntos de presencia para 12 especies de anfibios, siendo el artículo de Quezada-Hipólito *et al.* el que presentó más información de ocurrencia relevante al trabajo (Tabla 1).

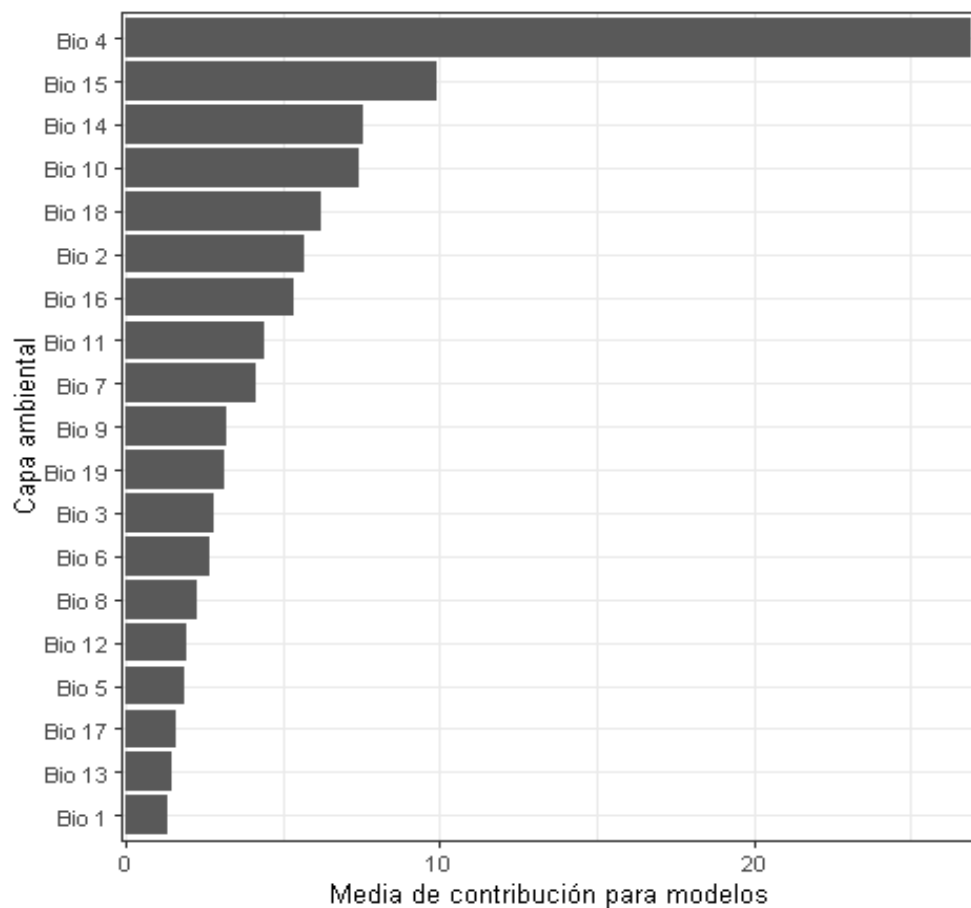
Se realizó el modelo de idoneidad para 40 especies de anfibios distribuidas en la FVT. Las especies seleccionadas pertenecen a los géneros *Dermophis*, *Dryophytes*, *Duellmanohyla*, *Eleutherodactylus*, *Exerodonta*, *Hyalinobatrachium*, *Hypopachus*, *Incilius*, *Isthmura*, *Leptodactylus*, siendo *Lithobates*.

Los valores del área bajo la curva ROC (AUC) calculados para todos los modelos, tanto para el entrenamiento como para la prueba (tabla 2), muestran que los modelos generados presentan un buen rendimiento (Fielding y Bell, 1997). La diferencia entre los valores de AUC para los datos de entrenamiento respecto a los de prueba es muy pequeña, por lo que el poder predictivo para los datos de ocurrencia es competente. De notar, los valores del modelo para *Eleutherodactylus angustidigitorum*, *Eleutherodactylus rufescens* y *Exerodonta xera* se registraron entre 0.99 y 1, tanto para los AUC de entrenamiento como de prueba, por lo que habría que considerar que el ajuste de los datos de ocurrencia fue bastante alto, llegando incluso a estar sobre ajustados. Por otro lado, el único modelo con un AUC menor a un 80% (0.8) correspondió a la especie *Lithobates catesbeianus*, con valores de 0.75 y 0.72 respectivamente para entrenamiento y prueba.

La variable ambiental que presentó el valor más alto de contribución relativa fue Bio4, con un promedio entre todos los modelos de 26.94%. Finalmente, la capa con menor contribución relativa fue Bio1, con una media de contribución de 1.3% (figura 1). Debido a su alto porcentaje, la variable de estacionalidad de la temperatura (Bio4) puede estar altamente correlacionada con otras capas, lo que puede alterar el entrenamiento de los modelos de MaxEnt, distribuyendo la contribución de manera asimétrica. Para futuras iteraciones se aconseja realizar un análisis de componentes para vislumbrar la correlación entre los datos, o eliminar esta capa para probar la equivalencia de contribución.

Los estimados de contribución para todas las especies indicaron que, dado a las condiciones ambientales con las que los modelos fueron entrenados, la probabilidad de distribución de las poblaciones de anfibios es dependiente tanto de la temperatura como de la precipitación. En otras palabras, no existe una mayor dependencia hacia las variables de temperatura sobre las variables de precipitación. Hay que considerar la relación que presenta la precipitación respecto a la temperatura y cómo el cambio climático (CC) no sólo afecta la temperatura en el ambiente, sino que también puede influir sobre los ciclos hidrológicos (Kundzewicz, 2008). Esto puede tener consecuencias imprevistas en los anfibios ya que estos son altamente sensibles a cambios de temperatura y de humedad, lo que puede llevar a una modificación en aspectos importantes de su historia de vida, comportamiento y la supervivencia en general de sus poblaciones (Corn, 2005; da Silva *et al.*, 2012).

La diferencia entre las áreas de distribución entre presente y futuro es estadísticamente significativa (p-value de U de Mann-Whitney < 0.05), por lo que se puede concluir que la distribución de las 40 especies de anfibios se ve afectada por las predicciones ambientales para el escenario de CC utilizado en el trabajo. Específicamente, cerca del 80% de las distribuciones predichas de las especies de anfibios tuvieron un aumento en área de idoneidad para el futuro (tabla 3), siendo las más notables las distribuciones de *Leptodactylus fragilis* y *Leptodactylus mystacinus*. Por lo contrario, hubo algunas especies que tuvieron una disminución en su área de idoneidad, y otras prácticamente desaparecieron de la FVT. Estas especies fueron: *Dryophytes wrightorum*, *Eleutherodactylus angustidigitum*, *Exerodonta xera*, *Incilius mccoysi* y *Lithobates dunni*.



**Figura1.** Promedio del porcentaje de contribución relativa de cada variable ambiental, ordenado de mayor a menor contribución.

**Tabla 3.** Área de idoneidad del nicho (Km<sup>2</sup>) al presente y futuro bajo escenarios de cambio climático para cada una de las especie, calculado a partir del umbral de la suma de positivos y verdaderos.

<b>Especie</b>	<b>Área presente (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Área futuro (km<sup>2</sup>)</b>
<i>Dermophis oaxacae</i>	19602.9	119661.4
<i>Dryophytes arenicolor</i>	111721.5	120136.1
<i>Dryophytes euphorbiaceus</i>	50276.5	120176.4
<i>Dryophytes eximius</i>	117770.3	2806.2
<i>Dryophytes plicatus</i>	54625.2	57029.9
<i>Dryophytes wrightorum</i>	109.9	0
<i>Duellmanohyla ignicolor</i>	1860.1	36562.4
<i>Eleutherodactylus albolabris</i>	38505.4	51983.2
<i>Eleutherodactylus angustidigitum</i>	66335.9	0
<i>Eleutherodactylus guttilatus</i>	8561.1	44320
<i>Eleutherodactylus modestus</i>	36233.3	118255.6
<i>Eleutherodactylus nitidus</i>	119033.9	120176.4
<i>Eleutherodactylus pipilans</i>	5298.4	6020.9
<i>Eleutherodactylus rufescens</i>	673.8	111726.2
<i>Exerodonta smaragdina</i>	77311.6	6709.9
<i>Exerodonta sumichrasti</i>	32604.9	120176.4
<i>Exerodonta xera</i>	8063.9	0
<i>Hyalinobatrachium fleischmanni</i>	1912.6	65123.5
<i>Hypopachus ustus</i>	1870	4320.3
<i>Hypopachus variolosus</i>	42489.1	120173.2
<i>Incilius cristatus</i>	27123.4	43152.1
<i>Incilius marmoreus</i>	22918.6	63439.5
<i>Incilius mazatlanensis</i>	1030.6	96168.8
<i>Incilius mccoysi</i>	109709.8	0
<i>Incilius occidentalis</i>	118945.4	120121.7
<i>Incilius perplexus</i>	32228.1	115579
<i>Incilius valliceps</i>	3826.3	1886.7
<i>Isthmura bellii</i>	78867.3	120176.4
<i>Isthmura gigantea</i>	3201.5	5029.1
<i>Leptodactylus fragilis</i>	108.9	119968.8
<i>Leptodactylus melanonotus</i>	10932	13330.1
<i>Leptodactylus mystacinus</i>	2164.4	120176.4
<i>Lithobates berlandieri</i>	28804	46323.7
<i>Lithobates catesbeianus</i>	49976.1	45383.1
<i>Lithobates dunni</i>	20552.1	0
<i>Lithobates forreri</i>	38482.8	49304.7
<i>Lithobates magnaocularis</i>	13505.5	117346.5
<i>Lithobates megapoda</i>	99032.6	50.5
<i>Lithobates montezumae</i>	82023	21839
<i>Lithobates neovolcanicus</i>	76978.1	119474.6



Los datos de CHELSA aplicados a los modelos de FVT indican que la temperatura anual aumentará 0.20°C, mientras que la precipitación anual disminuirá 1.58 mm/año. De acuerdo con los resultados del área de idoneidad, muchos de los anfibios de la FVT se verían beneficiados bajo estas condiciones de temperatura y precipitación. Tomando en cuenta lo anterior, se sabe que hay anfibios que son oportunistas y presentan una tolerancia a factores que restringen un comportamiento fisiológico adecuado (Shoemaker, 1992), además de que existen trabajos contemporáneos que investigan la tolerancia de ciertos anfibios frente al aumento de temperatura por medio del CC (Frishkoff *et al.*, 2015; Gangloff y Telemeco, 2018).

Existen factores que no fueron evaluados en este trabajo y pueden ser importantes para predecir la distribución de los anfibios. Una de estas variables es la proliferación bajo el CC de un número pequeño de patógenos emergentes que encuentran nuevas poblaciones que presentan poca resistencia, también saltando entre especies o encontrando nuevos vectores de transmisión, dando lugar a epidemias no previstas, lo que puede llevar al decaimiento de poblaciones enteras de animales, como a los propios anfibios (Harvel, 2002; El-Sayed y Kamel, 2020). También, los anfibios presentan una tasa de estrés cada vez más alta debido a los cambios radicales en regímenes de precipitación y temperatura, sumado al aumento de sequías y cambios en el uso de suelo. Todo esto contribuye a una menor tolerancia a enfermedades, como el ranavirus o la quitridiomycosis (Rollins-Smith, 2017). En general, las enfermedades que aquejan a los anfibios son factores difíciles de predecir debido a los diferentes mecanismos que están involucrados, en donde algunas enfermedades pueden proliferar mientras que otras pueden verse disminuidas (Blaustein *et al.*, 2010).

El CC puede afectar un número considerable de variables, no sólo ambientales sino también ecológicas, fisiológicas o etológicas, sin contar que muchas de estas variables pueden tener conexiones muy estrechas. Otros factores asociados a la proliferación del CC también afectan a los anfibios, como lo son las variables antrópicas como la urbanización o el cambio en el uso del suelo, que afecta la disponibilidad de recursos para la supervivencia (Wyman y Jancola, 1992; Herrmann *et al.*, 2005; Blaustein *et al.*, 2010; Hoff *et al.*, 2011). Tomando en cuenta lo discutido anteriormente, es importante el análisis y consideración de múltiples variables y la relación que pueden tener estas entre sí y la dimensionalidad que aportan a la distribución de los propios anfibios para así poder predecir el impacto que tiene el cambiante y preocupante panorama climático en estos, ya que el considerar sólo un grupo de variables como la temperatura o la humedad pueden llevar a predicciones bastante sesgadas en donde no se consideran las distintas y complejas pero importantes variables que afectan el nicho de los anfibios.

## **Conclusión.**

El modelaje de nicho con el método MaxEnt presentó una herramienta confiable para la predicción de distribución de múltiples especies de anfibios en el territorio mexicano bajo las capas ambientales con datos del presente y datos del futuro predichos bajo escenarios de cambio climático. Específicamente, variables relacionadas a temperatura y precipitación en conjunto contribuyen en gran medida a la elaboración de las dimensiones que construyen al nicho de la herpetofauna, aunque es posible la presencia de una alta correlación entre las variables utilizadas, por lo que es necesario un análisis profundo de dependencia entre las

capas ambientales. Por otro lado, las proyecciones de distribución de las especies de anfibios tuvieron una gran diferencia entre las áreas predichas al presente con respecto a las del futuro, y la mayoría tuvo un aumento drástico bajo las condiciones de cambio climático, aunque esto puede ser resultado del uso de sólo un grupo específico de variables ambientales. Se recomienda el uso de múltiples variables de distinta índole para el entrenamiento del modelo, como factores de relieve, uso de suelo, entre otros, para así poder generar proyecciones aún más apegadas a la ecología de las especies de anfibios que se encuentran en la Faja Volcánica Transmexicana.

### Literatura citada.

- Aguayo-Camargo, J. E. y Córdova, S. M. (1987). Origen y evolución de los rasgos morfológicos postcretácicos de México. *Boletín de la Sociedad Geológica de México*, 48(2), 15-39.
- Aguirre del Villar, B. D. (2022). *Modelo Nicho Anfibios FVT*. Recuperado de: <https://github.com/Red-Right-Hand1/Modelo-Nicho-Anfibios-FVT>
- Blaustein, A. R., Walls, S. C., Bancroft, B. A., Lawler, J. J., Searle, C. L. y Gervasi, S. S. (2010). Direct and indirect effects of climate change on amphibian populations. *Diversity*, 2(2), 281-313.
- Brown, C. J., O'Connor, M. I., Poloczanska, E. S., Schoeman, D. S., Buckley, L. B., Burrows, M. T., Duarte, C. M., Halpern, B. S., Pandolfi, J. M., Parmesan, C. y Richardson, A. J. (2016). Ecological and methodological drivers of species' distribution and phenology responses to climate change. *Global change biology*, 22(4), 1548-1560.
- Burzyński, M., Deuster, C., Docquier, F. y De Melo, J. (2019). Climate Change, Inequality, and Human Migration. *Journal of the European Economic Association*.
- Cohen, J. M., Civitello, D. J., Venesky, M. D., McMahon, T. A. y Rohr, J. R. (2019). An interaction between climate change and infectious disease drove widespread amphibian declines. *Global change biology*, 25(3), 927-937.
- Corn, P. S. (2005). Climate change and amphibians. *Animal Biodiversity and Conservation*, 28(1), 59-67.
- Cruz-Sáenz, D., Muñoz-Nolasco, F. J., Mata-Silva, V., Johnson, J. D., García-Padilla, E. y Wilson, L. D. (2017). The herpetofauna of Jalisco, Mexico: composition, distribution, and conservation. *Mesoamerican Herpetology*, 4(1), 23-118.
- da Silva, F. R., Almeida- Neto, M., do Prado, V. H. M., Haddad, C. F. B. y de Cerqueira Rossa- Feres, D. (2012). Humidity levels drive reproductive modes and phylogenetic diversity of amphibians in the Brazilian Atlantic Forest. *Journal of Biogeography*, 39(9), 1720-1732.
- Duellman, W. E. (1999). *Patterns of distribution of amphibians: a global perspective*. JHU Press.
- El-Sayed, A. y Kamel, M. (2020). Climatic changes and their role in emergence and re-emergence of diseases. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(18), 22336-22352.
- Fielding, A. H. y Bell, J. F. (1997). A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. *Environmental conservation*, 24(1), 38-49.
- Frishkoff, L. O., Hadly, E. A. y Daily, G. C. (2015). Thermal niche predicts tolerance to habitat conversion in tropical amphibians and reptiles. *Global change biology*, 21(11), 3901-3916.

- Gámez, N., Escalante, T., Rodríguez, G., Linaje, M. y Morrone, J. J. (2012). Caracterización biogeográfica de la Faja Volcánica Transmexicana y análisis de los patrones de distribución de su mastofauna. *Revista mexicana de biodiversidad*, 83(1), 258-272.
- Gangloff, E. J. y Telemeco, R. S. (2018). High temperature, oxygen, and performance: Insights from reptiles and amphibians. *Integrative and Comparative Biology*, 58(1), 9-24.
- González-Fernández, A., Manjarrez, J., García-Vázquez, U., D'Addario, M. y Sunny, A. (2018). Present and future ecological niche modeling of garter snake species from the Trans-Mexican Volcanic Belt. *PeerJ*, 6, e4618.
- Guisan, A. y Thuiller, W. (2005). Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology letters*, 8(9), 993-1009.
- Harvell, C. D., Mitchell, C. E., Ward, J. R., Altizer, S., Dobson, A. P., Ostfeld, R. S. y Samuel, M. D. (2002). Climate warming and disease risks for terrestrial and marine biota. *Science*, 296(5576), 2158-2162.
- Herrmann, H. L., Babbitt, K. J., Baber, M. J. y Congalton, R. G. (2005). Effects of landscape characteristics on amphibian distribution in a forest-dominated landscape. *Biological Conservation*, 123(2), 139-149.
- Hirzel, A. H. y Le Lay, G. (2008). Habitat suitability modeling and niche theory. *Journal of applied ecology*, 45(5), 1372-1381.
- Hof, C., Araújo, M. B., Jetz, W. y Rahbek, C. (2011). Additive threats from pathogens, climate and land-use change for global amphibian diversity. *Nature*, 480(7378), 516-519.
- Howell, P. E., Hossack, B. R., Muths, E., Sigafus, B. H. y Chandler, R. B. (2020). Informing amphibian conservation efforts with abundance-based metapopulation models. *Herpetologica*, 76(2), 240-250.
- Karger, D.N., Conrad, O., Böhner, J., Kawohl, T., Kreft, H., Soria-Auza, R.W., Zimmermann, N.E., Linder, P. y Kessler, M. (2017). Climatologies at high resolution for the Earth land surface areas. *Scientific Data*. 4 170122.
- Karger, D.N., Conrad, O., Böhner, J., Kawohl, T., Kreft, H., Soria-Auza, R.W., Zimmermann, N.E., Linder, H.P. y Kessler, M. (2021) Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. *EnvDat*. [https://doi.org/ 10.16904/envdat.228.v2.1](https://doi.org/10.16904/envdat.228.v2.1)
- Klymus, K. E. y Gerhardt, H. C. (2012). AFLP markers resolve intra-specific relationships and infer genetic structure among lineages of the canyon treefrog, *Hyla arenicolor*. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 65(2), 654-667.
- Kundzewicz, Z. W. (2008). Climate change impacts on the hydrological cycle. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 8(2-4), 195-203.
- Quezada-Hipolito, J., Smith, E. N., Suazo-Ortuño, I., Alvarado-Díaz, J., González, C., Thammachoti, P. y Smart, U. (2019). Diversidad y divergencia de 10 especies de anfibios de la Cuenca del Río Santiago como resultado del vulcanismo en el Cinturón Volcánico Transmexicano. *Revista mexicana de biodiversidad*, 90.
- Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J. S., KC, S, Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., Ebi, K., Hasegawa, T., Havlik, P., Humpenöder, F., Da Silva, L. A., Smith, S., Stehfest, E., Bosetti, V., Eom, J., Gernaat, D., Masui, T., Rogelj, J., Strefler, J., Drouet, L., Krey, V., Luderer, G., Harmsen, M., Takahashi, K., Baumstark, L., Doelman, J. C., Kainuma, M., Klimont, Z., Marangoni, G., Lotze-Campen, H., Obersteiner, M., Tabeau, A., Tavoni, M (2017). The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview. *Global environmental change*, 42, 153-168.

- Rollins-Smith, L. A. (2017). Amphibian immunity–stress, disease, and climate change. *Developmental & Comparative Immunology*, 66, 111-119.
- Shoemaker, V. H. (1992). Exchange of Water, Ions, and Respiratory Gases in Terrestrial Amphibians. En M. E. Feder y W. W. Burggren (Ed.). *Environmental Physiology of the Amphibians* (125-154). Chicago: University of Chicago Press.
- Sunny, A., González-Fernández, A. y D'Addario, M. (2017). Potential distribution of the endemic imbricate alligator lizard (*Barisia imbricata imbricata*) in highlands of central Mexico. *Amphibia-Reptilia*, 38(2), 225-231.
- Vitt, L. J. y Caldwell, J. P. (2013). *Herpetology: An Introductory Biology of Amphibians and Reptiles*. (2da Ed.). Academic Press.
- Woolrich-Piña, G. A., García-Padilla, E., DeSantis, D. L., Johnson, J. D., Mata-Silva, V. y Wilson, L. D. (2017). The herpetofauna of Puebla, Mexico: composition, distribution, and conservation. *Mesoamerican Herpetology*, 4(4), 794-884.
- Woolrich-Piña, G. A., Ponce-Campos, P., Loc-Barragán, J., Ramírez-Silva, J. P., Mata-Silva, V., Johnson, J. D. y Wilson, L. D. (2016). The herpetofauna of Nayarit, Mexico: composition, distribution, and conservation. *Mesoamerican Herpetology*, 3(2), 376-448.
- Wyman, R. L., & Jancola, J. (1992). Degree and scale of terrestrial acidification and amphibian community structure. *Journal of Herpetology*, 392-401.
- Zhang, Y., Cheng, C., Yang, T., Jin, X., Jia, Z., Shen, J., & Wu, X. (2022). Assessment of climate change impacts on the hydro-wind-solar energy supply system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 162, 112480.
- Zhang, P., Dong, X., Grenouillet, G., Lek, S., Zheng, Y. y Chang, J. (2020). Species range shifts in response to climate change and human pressure for the world's largest amphibian. *Science of the Total Environment*, 735, 139543.