

Desarrollo y adaptación de herramientas de modelamiento y simulación de distribución de especies de frutales nativos en Loreto y San Martín: Conceptualización del proceso de modelamiento y simulación

José Sanjurjo

I. Introducción

La Amazonía peruana tiene una extensión de 75 millones de ha aproximadamente, abarcando alrededor del 65% del territorio nacional; incluye a los departamentos de Loreto, Ucayali, Madre de Dios, San Martín, Huánuco, Pasco entre otros. Asimismo posee fronteras internacionales con Ecuador, Colombia, Brasil y Bolivia.

La Amazonía es física, biológica y socioculturalmente muy heterogénea. Esta complejidad se manifiesta, principalmente, en los bosques amazónicos que se caracterizan por tener una alta diversidad biológica como resultado de las particularidades físicas (clima, fisiografía, geomorfología, entre otros) que caracterizan a los diversos espacios de la región; encontrándose en estos muchas especies endémicas, y que están asentados sobre suelos muy diversos que, generalmente, tienen su origen en el material parental proveniente de los Andes y que es transportado por los ríos como masa sedimentaria.

Esta región, cuya ocupación es milenaria, hoy en día esta sometida a una fuerte presión antrópica que se traduce en las labores agrícolas basadas en las prácticas de tumba y quema y que son desarrolladas principalmente por los ribereños como medio de subsistencia, así como en procesos de intervención derivados de la política económica nacional sobre la base de la que se percibe la amazonía como una región proveedora de recursos inagotables y en razón de la cual se han establecido complejos extractivistas petroleros, mineros, agrícolas, entre otros; que conducen al desarrollo de infraestructura urbana, vial y energética ocupando grandes áreas del territorio y destruyendo, en consecuencia, ecosistemas primigenios y aniquilando o poniendo en peligro de extinción numerosas especies de flora y fauna.

El acelerado deterioro de la región es un factor que conduce a la pérdida de información debido a la destrucción de ecosistemas y especies de flora y fauna que aún no han sido estudiadas; pues las interacciones que moldean el funcionamiento del complejo ecosistema amazónico, las interrelaciones y el valor de la biodiversidad y las relaciones del hombre autóctono con la naturaleza, apenas comienzan a conocerse.

En tal sentido, la obtención de datos suficientes que permitan el análisis objetivo del comportamiento de tal Biodiversidad significa ejecutar numerosos inventarios y muestreos con la finalidad de cubrir el mayor espacio posible del territorio; no obstante, llevar a cabo esta tarea es materialmente imposible por cuanto la extensión de la amazonía (aprox. 75 millones de ha) hace imposible el conseguir recursos financieros suficientes para cumplir con tal labor.

Sin embargo, mediante el modelamiento y la simulación es posible generar aproximaciones que permiten analizar e interpretar el comportamiento de las especies y entender la complejidad de las interacciones entre ellas; proporcionando las bases para el diseño de experimentos y muestreos de alta calidad, reduciéndose, en consecuencia, los costos financieros.

II. Objetivos

2.1 Objetivo General

- Proporcionar tecnologías que faciliten el análisis predictivo de la distribución de especies.

2.2 Objetivos Específicos

- Contar con herramientas para el modelamiento y simulación de la distribución de especies de frutales nativos en las regiones de Loreto y San Martín

III. Productos

- Mapas de Distribución de especies de Frutales Nativos en las regiones de Loreto y San Martín en un escenario climático actual.
- Mapas de Distribución de especies de Frutales Nativos en las regiones de Loreto y San Martín en un escenario de cambio climático.

IV. Marco Conceptual

4.1 Distribución de Especies

Cada especie sobre nuestro planeta ocupa una distribución geográfica única que es el lugar donde los miembros de varias poblaciones viven, se alimentan y reproducen. Algunas especies tienen amplia distribución geográfica que se extiende por varios continentes en tanto que otras especies pueden tener una distribución geográfica restringida a una pequeña área en un solo continente (Pidwirny, 2006).

La distribución geográfica de una especie es el conjunto de localidades donde ésta ha sido registrada, ya sea mediante la colecta de especímenes o la observación. Un área de distribución geográfica, en cambio, resulta de la inferencia acerca de cuál es el área con mayor probabilidad de que una determinada especie esté presente (Espinosa; et al. 2001).

Dependiendo de su historia y de sus capacidades de dispersión las especies pueden ocupar grandes extensiones de territorio o estar restringidas a pequeñas regiones. Las actividades humanas constantemente modifican las áreas de distribución de las especies, creando y destruyendo hábitats, estableciendo barreras y corredores y transportando accidental o voluntariamente a las especies a nuevos lugares (Biodiversidad Mexicana, 2010).

- **Términos relacionados al origen y distribución de las especies. (Biodiversidad Mexicana, 2010).**

Especie nativa. Especie que se encuentra dentro de su área de distribución natural u original (histórica o actual) de acuerdo con su potencial de dispersión natural. La especie forma parte de las comunidades bióticas naturales del área. Las especies nativas tienen relaciones evolutivas y ecológicas con otras especies con las que han compartido su historia. Están bien adaptadas a las condiciones locales.

Especie endémica. Especie que se encuentra restringida a una región. El término endémico es relativo y siempre se usa con referencia a la región. Los grupos de especies con menor capacidad de dispersión, como algunos insectos, anfibios y reptiles, tienen más especies con distribución restringida. Las especies endémicas son frágiles ante las perturbaciones ya que su área entera de distribución puede ser alterada.

Especie exótica. Especie introducida fuera de su área de distribución original. Muchas de las especies de plantas ornamentales y de animales domésticos son especies exóticas provenientes de otros continentes. Las especies exóticas no tienen relaciones evolutivas con las especies con las que se encuentran en su nuevo territorio y pueden ocasionar fuertes problemas transmitiendo enfermedades desconocidas, compitiendo o depredando a las especies nativas.

Especie invasora. Especie que por nuevas condiciones creadas en su ambiente aumenta su población y distribución geográfica. Son especies con gran capacidad de dispersión y colonización. Pueden ser especies nativas o exóticas. En general, causan daños al ambiente, a la economía y a la salud humana. De hecho, se consideran la segunda causa de extinción de especies, después de la pérdida de hábitat.

La búsqueda de los factores que determinan la distribución de los organismos ha sido una de las metas centrales de la ecología. Se conoce que varios factores abióticos y bióticos, tales como precipitación, temperatura, evapotranspiración, competencia y depredación interactúan y limitan la distribución de cada especie (Krebs 2001, Molles 2002; citados por Naoki, et. al. 2006)

La temperatura es uno de los principales factores que limitan la distribución de las poblaciones. Actúa en todas las etapas del ciclo de vida, afecta la supervivencia, el desarrollo y la reproducción. Ejerce efectos limitantes sobre su capacidad competitiva, su resistencia a los depredadores, parásitos y a las enfermedades. La humedad es otro factor fundamental que puede limitar los rangos de distribución de los organismos. La distribución y diversidad de las plantas están altamente relacionadas con la humedad. Por consiguiente los organismos han desarrollado una serie de adaptaciones evolutivas para superar las condiciones impuestas por las bajas o altas temperaturas o la falta de humedad (Ramírez, 2007)

La distribución geográfica de las especies está en continuo cambio, se expande y contrae con el paso del tiempo. Estos cambios resultan de dos procesos contrastantes: El establecimiento de la especie, que tiene lugar cuando estos colonizan nuevas áreas y son capaces de mantener poblaciones reproductivamente viables; y la extinción, que es un proceso que elimina a los miembros de una especie de todo o de parte del área de distribución (Pidwirny, 2006)

La amplia variedad de las formaciones vegetales de la amazonía peruana, que han sido clasificadas y mapeadas por diversos autores tal como Josse; et. al. 2007; Encarnación; et. al. 2004, al ser el resultado de las relaciones existentes entre una extensa variedad de factores bióticos y abióticos (clima, fisiografía, suelos, temperatura, etc.) dejan en evidencia la heterogeneidad de los ecosistemas existentes en esta región y, consecuentemente, la de especies.

En los últimos años la amazonía ha experimentado una acelerada degradación y pérdida de especies, por lo tanto es de prioridad la selección de regiones con altos índices de amenaza sobre las especies que alberga, con el objeto de establecer áreas de protección; así como la de formulación de planes de manejo adecuados a las condiciones particulares de cada zona.

El conocimiento sobre distribución de las especies amazónicas es muy escaso, y la existente no está sistematizada, de modo que la información disponible no es suficiente para apuntalar los procesos de toma de decisión de los agentes involucrados con la conservación y manejo de la vida silvestre en esta región de la país.

4.2 Modelamiento y Simulación

Un sistema es un conjunto de componentes interrelacionados que poseen un límite y funcionan como una unidad. Un sistema es cualquier conjunto de materiales y procesos que se comunican para realizar una serie de funciones. Un sistema es un conjunto de procesos interconectados caracterizados por muchas vías recíprocas de causa y efecto (Grant, 2001).

El análisis de sistemas se puede definir como la aplicación del método científico a problemas relacionados con sistemas complejos. Es un conjunto de teorías y técnicas que sirven para estudiar, describir y hacer predicciones acerca de sistemas complejos, y que frecuentemente hace uso de la matemática avanzada, procedimientos estadísticos y computadoras (Grant, 2001).

Un modelo es una abstracción o representación formal de un sistema o proceso. Es decir un modelo representa algún aspecto particular de la realidad convirtiéndose en un referente de la misma, que permite a los usuarios del modelo comprender e interactuar con la realidad, aunque de forma simplificada y exenta de la complejidad y riesgos potenciales del mundo real (Lahoz-Beltrá, 2009).

Según diversos autores los modelos se pueden clasificar en variadas clases (Forrester 1961, Gold 1977, Jeffers 1978, citados por Grant, 2001).

Algunas de las dicotomías mas relevantes incluyen modelos: físicos y abstractos; dinámicos estáticos; empíricos y mecanísticos; Determinístico y estocásticos; de simulación y analíticos; que son utilizados de acuerdo a los intereses del usuario (Grant, 2001).

La utilidad de la clasificación de los modelos es dudosa, sin embargo la pertenencia de un modelo a una determinada clase influirá en las consideraciones generales sobre sus características estructurales y metodología de desarrollo. En numerosos casos la pertenencia de un modelo a una cierta clase se antoja un tanto subjetiva puesto que generalmente depende de la decisión del investigador (Lahoz-Beltrá, 2004).

Simulación es el uso de un modelo para imitar, o describir paso a paso, el comportamiento del sistema que estamos estudiando. Los modelos de simulación están compuestos de una serie de operaciones aritméticas y lógicas que, en conjunto, representan la estructura (el estado) y el comportamiento (el cambio de estado) del sistema de interés (Grant, 2001).

Una simulación es la creación de un sistema artificial capaz de manifestar el mismo comportamiento que el sistema real, y partir del cual es incluso posible inferir ciertas propiedades del sistema real (Lahoz-Beltrá, 2004).

En el estudio de sistemas dinámicos no siempre se utiliza la simulación. Hay muchos métodos para el modelado de tales sistemas y que no involucran la simulación, por cuanto implican la solución a un sistema cerrado (como un sistema de ecuaciones lineales). La simulación es a menudo indispensable en los casos siguientes: 1) el modelo es muy complejo con muchas variables y componentes que interactúan, 2) las relaciones de la variables subyacentes no son lineales, 3) el modelo contiene variables aleatorias, 4) el resultado del modelo debe ser visual tal como en las animaciones por computadora en 3D (Fishwick, 2010).

a) Modelamiento, Simulación y Ecosistemas

Un ecosistema se refiere a todos los organismos en un área dada interactuando con el medioambiente físico, de manera que un flujo de energía transporta la estructura trófica, la diversidad biótica y los ciclos de materiales (Van Dyke, 2008).

Los sistemas medioambientales consisten de elementos geofísicos y geoquímicos, factores abióticos complejos (atmósfera, hidrósfera, pedósfera, etc.) y elementos bióticos (procesos de crecimiento, dinámica poblacional, entre otros) que hacen de estos, sistemas reales complejos. Mediante la tecnología de la información se ha logrado desarrollar herramientas adecuadas para modelar, simular, planificar y suministrar información a los agentes de decisión cuyo quehacer tiene que ver con el medioambiente y su protección (Sydow, 1998).

Hoy en día la disponibilidad de los recursos computacionales y de las tecnologías de comunicación han proporcionado a los investigadores elementos que permiten la generación de modelos, simulaciones y herramientas de soporte para los agentes de decisión, de gran calidad. Sin embargo, el modelamiento de la biosfera considerando un número mayor de componentes bióticos y abióticos sigue siendo un gran desafío. Así, las investigaciones climáticas (clima espacial incluido) que utiliza modelos que tratan de diversas escalas y resoluciones, requerirá de nuevas arquitecturas, con acceso a los recursos distribuidos, en tanto se incorporen nuevas variables. Los sistemas de simulación orientados a los dominios deberán confirmar que las herramientas de software aplicables sean tan flexibles como para adaptarse a la estructura especial y a los datos de los complejos sistemas medioambientales (Lux y Sydow, 2005).

El término sistema engloba los elementos de función y sus interacciones. Las relaciones funcionales de los elementos del sistema originan las propiedades específicas y capacidades

del mismo que se conocen como propiedades del sistema. La medición cuantitativa de los elementos del sistema es muy difícil, ya que estas no se pueden realizar directamente sin alterar el resultado de las reacciones que dentro de ella se producen, en tal sentido es que la aproximación matemática es muy útil ya que permite considerar los factores internos de modo que diversos parámetros pueden ser cambiados con el objeto de simular la reacción del sistema, delinear su capacidad y, si es necesario, predecir desarrollos futuros (Sengbusch, 2003a).

A pesar de que diversas estimaciones no pueden ser ponderadas a través de las matemáticas y aunque muchas otras consideraciones matemáticas pueden ser utilizadas en diversas áreas técnicas, es extremadamente difícil expresar las propiedades de los sistemas biológicos a través de las ecuaciones matemáticas. Un matemático puede desarrollar un modelo que exhibe ciertas propiedades de un sistema vivo, pero estará muy lejos de considerar todas las propiedades. En tal sentido, será necesario considerar dos tipos de modelos: Determinístico cuando los elementos que tiene el sistema interactúan en forma predecible; y Probabilísticos ó Estocásticos cuando tal interacción no se conoce totalmente, de modo que deben ser descritos con ayuda de las probabilidades (Sengbusch, 2003a).

Los ecosistemas usualmente son sistemas estocásticos porque depende de una gran variedad de parámetros diferentes, algunos de los cuales nunca serán capturados, por un lado. Por otro lado, son estocásticos porque siempre serán sistemas abiertos pues sus mas importantes miembros, los organismos, dependen de una provisión constante de energía (Sengbusch, 2003b).

b) Modelamiento de la Distribución de Especies

En las últimas tres décadas, el estudio de la distribución de especies ha diversificado su enfoque desde preguntas netamente científicas a las más prácticas para la conservación. Este cambio es una de las respuestas de la comunidad científica a la acelerada degradación de los hábitats naturales y a la extinción de las especies (Groom et al. 2006 citado por Naoki, 2008).

La actual crisis de extinción de especies requiere de acciones dramáticas para salvar la amplia variedad de vida sobre la tierra. Debido a que los fondos para la conservación son limitados, los gobiernos, donantes y grupos de conservación deben ser estratégicos y designar la mayor cantidad de recursos para proteger las áreas ricas en biodiversidad (Olson & Dinerstein, 1998).

Una estrategia global para conservar la biodiversidad debe proteger muestras representativas de todos los ecosistemas del mundo, tanto de áreas que contienen concentraciones excepcionales de especies como de áreas de endemismos (Olson & Dinerstein, 2002).

La Amazonía es una de las más importantes reservas genéticas y de agua dulce de la Tierra. Algunos científicos se atreven a calcular que alberga en su inmenso territorio entre 60 y 80% de todas las especies y cerca del 20% del agua dulce no congelada del planeta. La Amazonía es también muy rica en biodiversidad por unidad de área (la llamada biodiversidad alfa) y en especies endémicas (aquellas restringidas a un área muy pequeña). Los bosques más ricos de toda la cuenca se ubican en la llamada Amazonía andina, situada en su sección más occidental, donde se encuentran algunos de los "puntos calientes" de biodiversidad o *hotspots* más importantes del planeta (Alvarez, 2006)

La distribución de especies en la Amazonia Peruana ha sido poco estudiada lo cual resulta en serias deficiencias de información útil a los agentes de decisión involucrados con la formulación de planes y programas para la conservación de áreas endémicas o de alta concentración de especies.

La comunidad científica que trabaja en biodiversidad, ecología y conservación ha desarrollado herramientas muy potentes capaces de modelar la distribución potencial de las especies biológicas. Estas herramientas son conocidas como "modelos de distribución de

especies" (Species distribution models, con el acrónimo SDMs), "modelos predictivos de distribución del hábitat" (predictive habitat distribution models), "modelos de idoneidad del hábitat" (habitat suitability models, con el acrónimo HSMs), o "modelos de nicho ecológico" (Benito, 2007).

Un sistema ideal de predicción de distribución de especies debe tomar como datos de ingreso las especies y el área de interés, y en base a ellos producir imágenes, mapas, documentación y modelos fácilmente comprensibles para explicar, vía INTERNET, las relaciones existentes entre tales datos (Stockwell & Peters, 1999).

La integración de los modelos de distribución de especies (SDM) con los SIG ofrece muchas perspectivas alentadoras para el análisis de la biodiversidad debido al perfeccionamiento continuo del soporte para la modelización del medio ambiente, la optimización constante de las herramientas para compartir y administrar grandes volúmenes de datos así como para la visualización y difusión de los resultados a través de la mejora permanente de los instrumentos de elaboración de las representaciones SIG que permiten obtener productos más apropiados a las nuevas necesidades. Sin embargo, persiste la debilidad fundamental en nuestra capacidad para abordar eficazmente los problemas generalizados entre los SIG y la modelización de procesos ambientales, incluyendo la variabilidad temporal, la escala, la representación, la exactitud, la visualización y el contexto espacial (Goodchild, 2002).

Las variables ambientales en formato SIG todas pertenecen a la misma área geográfica, el área de estudio, que se divide en una cuadrícula de píxeles. La tarea de un método de modelado es predecir la idoneidad del medio ambiente para las especies en función de las variables ambientales dadas (Phillips, et al.; 2006).

El objetivo de los modelos es predecir la distribución espacial más probable de una especie o comunidad biológica. Para conseguirlo trabajan sobre una base matemático-estadística que relaciona el suceso de ocurrencia de la especie con los valores de variables ambientales que tienen influencia en la distribución, apoyándose en un entorno SIG. El resultado final es un mapa digital que expresa la distribución espacial del hábitat de la especie de estudio (Benito, 2007).

El enfoque representativo (mapa), aceptado por un número creciente de conservacionistas, se ha establecido sólidamente en biología de la conservación. Integra el objetivo de mantener la diversidad de especies (enfoque tradicional de la conservación de la biodiversidad) con otro nivel de acción para la conservación, la preservación de ecosistemas y procesos ecológicos distintivos (Olson & Dinerstein, 1998).

El mapa digital que expresa la distribución espacial del hábitat tiene distintas utilidades según su campo de aplicación: a) diseño de reservas para conservación, b) diseño de muestreos en campo para localizar poblaciones "ocultas" de plantas o animales, c) estudio del potencial invasor de una especie, d) predicción de los cambios que puede provocar el cambio global en la distribución de las especies, e) estudio de los patrones espaciales de la biodiversidad, f) predicción del patrón geográfico de propagación de enfermedades infecciosas, etc. (Benito, 2007).

La ausencia de datos limita la validación de los modelos en áreas tropicales, lo que a su vez restringe considerablemente la aplicación de los modelos de distribución de especies. A pesar de dichas limitaciones, los modelos de distribución de especies tienen un gran potencial para la conservación de la biodiversidad de los trópicos, pudiendo contribuir al desarrollo de planes y estrategias de conservación, la identificación de vacíos de información y la generación de herramientas que examinen el impacto potencial de los cambios ambientales sobre la distribución de las especies (Cayuela, 2009).

V. Marco Metodológico

5.1 Algoritmos para el Modelamiento y Simulación de la Distribución de Especies

En varios estudios se ha constatado que los diferentes algoritmos presentan distinta precisión a la hora de estimar la distribución del hábitat idóneo para una especie. En general los resultados no son concluyentes, funcionando de modo diferente los algoritmos según la especie, la cantidad de registros de presencia, o el número de variables predictoras (Benito y Peñas, 2007).

Se lista a continuación algoritmos basados en el registro de presencias para generar los modelos de distribución de especies.

Bioclim: Este algoritmo, implementado en el programa de gestión de recursos florísticos DIVA-GIS (www.diva-gis.org) (Hijmans *et al.*, 2004), genera para la especie un rango ecológico de n dimensiones, siendo n el número de variables predictoras, mediante un análisis de la distribución de los registros de presencia sobre cada variable ambiental. El hiper-rectángulo resultante está caracterizado por una tolerancia mínima y máxima que determinan los límites de idoneidad. El modelo de hábitat se genera otorgando a cada celda un valor de distancia ecológica relativo a la posición que ocupa dentro del rango multidimensional de la especie. Este algoritmo no admite para el análisis capas de información cualitativa como usos del suelo y similares (Busby, 1991; citado por Benito y Peñas, 2007).

Domain: Algoritmo que ofrece ventajas sobre sus similares, su fortaleza es su capacidad para operar eficientemente usando únicamente registros de presencia y un limitado número de atributos biofísicos. El uso de una función continua de similaridad proporciona a DOMAIN un aumento de la flexibilidad como una herramienta heurística, adecuado para su aplicación en el diseño de encuestas, selección de reservas y representación (mapas) del potencial de especies raras y comunes. Utiliza la métrica de similaridad punto a punto, para asignar un valor de clasificación al sitio candidato, sobre la base de proximidad en espacios ambientales con registros de sitios similares. Recurre a la métrica de Gower para obtener una media adecuada de cuantificación de la similaridad entre dos sitios (Carpenter, *et al.* 1993).

ENFA - Ecological Niche Factor Analysis: Este análisis es la parte central de Biomapper. Calcula los factores, tal como en el Análisis de Componentes Principales (Principal Components Analysis - PCA), que explican la mayor parte de la distribución ecológica de las especies. Como en el análisis PCA, los factores extraídos son totalmente no correlacionados pero tienen significado biológico: El primer factor es el de marginalidad, que describe hasta qué punto el óptimo ambiental de la especie es el hábitat medio en el área de estudio. Los factores de especialización son ordenados en base a una cantidad decreciente de la varianza explicada. Describen el grado de especialización de la especie en relación al rango de hábitats disponibles en el área de estudio. De modo que, sólo unos pocos de los primeros factores explican la mayor parte de toda la información. Los mapas de aptitud del hábitat (Habitat Suitability – HS) son calculados por adaptación de modelos numéricos o estadísticos sobre datos ambientales y de distribución de especies (Hirzel, 2009).

GARP – Genetic Algorithm for Rule-set Prediction. Este algoritmo utiliza el SIG únicamente como módulo para acondicionamiento de los datos ambientales. GARP ha sido clasificado como un sistema de acoplamiento flexible, puesto que por su arquitectura puede ser fácilmente reconfigurado y por lo tanto fácil de integrar y personalizar. Una implementación típica de GARP utiliza más de 30 capas rasterizadas de datos ambientales con variables climáticas (promedios de precipitación y temperatura), topográficas (pendiente, aspecto, altitud) y de substrato (tipo de suelo, pH, geología). En el análisis, GARP aplica un conjunto de reglas basado en relaciones “Si – Entonces”, estas serán aprovechadas si las condiciones existentes así lo determinan. El conjunto de reglas es desarrollado a través de un refinamiento evolutivo, ensayando y seleccionando las normas sobre subconjuntos aleatorios de conjuntos de datos de entrenamiento. Establece la significancia a través de un test de χ^2 sobre la diferencia en la probabilidad del valor pronosticado (usualmente presencia o ausencia de la especie) antes y después de la aplicación de la regla. Los resultados de la predicción son convertidas en

imágenes y productos en HTML para ser vistos en un Web browser; proporciona interfaces para integrar imágenes, textos y documentación suplementaria (Stockwell y Peters, 1999).

MaxEnt: Es un método de uso general para generar predicciones o inferencias a partir de datos únicamente de presencia. Maxent estima la distribución de probabilidad de una especie, a través del cálculo de la distribución de probabilidad de máxima entropía (ej. Cuál es el más disperso o el más cercano a una constante) sujeta a un conjunto de restricciones que representan la información incompleta acerca de la distribución de la especie. La información disponible sobre la distribución de la especie a menudo se presenta como un conjunto de variables de valor real, llamado "características", y las limitaciones son que el valor esperado de cada función debe coincidir con su media empírica (Valor promedio de un conjunto de puntos de muestra tomada de la distribución de la especie). Cuando se aplica MaxEnt en el modelamiento de la distribución de especies con "solo-presencia", los píxeles del área de estudio constituyen el espacio sobre el cual MaxEnt define la distribución de probabilidad, los píxeles con registros conocidos de ocurrencia de especies constituyen los puntos muestrales, y las características son las variables climáticas, elevación, categoría de suelos, tipos de vegetación y otras variables ambientales y sus funciones (Phillips; et al. 2006).

5.2 DIVA-GIS

DIVA-GIS es un software de Sistemas de Información Geográfica diseñado para analizar y representar datos de biodiversidad. Facilita la generación de mapas de distribución geográfica de la biodiversidad (especies de plantas y animales) de los sitios de colección. DIVA permiten ejecutar diversos análisis basados en cuadrículas. Las funciones analíticas son: a) *Número de Observaciones*, que permite al usuario determinar el número de observaciones por cada celda de la cuadrícula; b) *Numero de Valores Diferentes*, función que calcula el número de clases distintas que ocurren en cada celda de la cuadrícula; c) *Índices de diversidad*, se puede calcular una serie de índices de diversidad para cada celda de la cuadrícula, para ello se selecciona una variable (campo) de la base de datos para el cual se calcula este índice; d) *Selección Complementaria de Sitios*, procedimiento que ayuda a identificar grupos de celdas de la cuadrícula que son complementarios; así mismo proporciona funciones estadísticas y de análisis de la autocorrelación espacial (Hijmans; et al, 2001a).

Para apreciar el estado de conservación del maní silvestre se evaluaron 2175 observaciones georreferenciadas del género *Arachis spp* con el objeto de priorizar acciones futuras de conservación biológica y geográfica. Para determinar ubicaciones óptimas de reservas in-situ para conservar la máxima diversidad de especies, se usó el software DIVA-GIS para ejecutar un estudio de complementariedad de especies. Este procedimiento permite identificar, en la cuadrícula utilizada, las celdas de tamaño predefinido que se complementan con otras en términos de composición de especies, aunque cualquier otra característica biológica podría ser utilizada tanto taxonómica, morfológica o genética. El proceso es iterativo, por lo cual la primera celda ubicada es el más rico en especies. La segunda iteración ubica una celda de la cuadrícula que es rica en especies no representadas en la primera iteración. El proceso iterativo continúa hasta que todas las especies han sido representadas y se ejecutó sobre un número mínimo de celdas para capturar las 60 especies silvestres de *Arachis spp*. El tamaño de celda fue de 50 x 50 km. Las predicciones de la distribución de especies fueron hechas sobre la base de 36 variables climáticas, que fueron complementados con datos de uso del suelo para representar la distribución potencial de cada especie (Jarvis; et al, 2003)

Con el propósito de predecir la distribución geográfica potencial del pulgón de la caña de azúcar se usaron dos metodologías computacionales GARP y DIVA-GIS, usando como fuente de datos su distribución actual y datos de un amplio rango de parámetros medio ambientales. DIVA-GIS utiliza BIOCLIM (sistema de predicción y análisis Bioclimático) para identificar las áreas o nichos, que pueden ser invadidos por el organismo, basado en las características climáticas y ecológicas de los datos de muestreo en los puntos de presencia conocida de la especie. GARP intenta identificar el nicho de las especies definidas en varias dimensiones de las variables climáticas, físicas y ecológicas. El principio fundamental es la construcción de un conjunto de reglas que caracterizan los requerimientos ecológicos de la especie, en base a los límites definidos por el muestreo en los puntos georreferenciados de presencia conocida de la

misma. Los resultados de las simulaciones obtenidos con DIVA-GIS fueron idénticos a los obtenidos con GARP, aunque sugiere una distribución mas restringida en tres zonas distintas de presencia de la papa (Ganeshaiah; et al., 2003)

Usando una base de datos de 6073 observaciones georreferenciadas se analizó la distribución geográfica de papas silvestres (Solanaceae sect. *Petota*). La presencia de datos de coordenadas en la base de datos permitió el análisis con SIG (ArcView GIS de ESRI) y DIVA-GIS. Se utilizó una cuadrícula con celdas de 50 x 50 km con un área circular de 50 km, con los que se asignaron puntos a las celdas que fueron usadas para representar la riqueza de especies. La mayor riqueza de especies ocurre en el norte de Argentina, en el centro de Bolivia, en el centro de Ecuador y al Sur y Norte-Central del Perú. El mas alto número de especies ocurren en el sur de Perú (Hijmans, 2001b).

Se emplearon datos de localización de 1646 muestras de 87 especies recogidas en 12 países de las Américas, para analizar el grado en que los factores taxonómicos, geográficos y ecológicos pueden predecir la tolerancia de la papa silvestre a las heladas. Utilizando el software DIVA-GIS y sobre una cuadrícula con celdas de 100 x 100 km se generó un mapa de las medias y las máximas tolerancias a las heladas observadas. Los cálculos se hicieron con cada observación individual asignándole el mismo peso, independientemente de la especie o la serie. Se utilizó una proyección Lambert azimutal (igual área), con 80° al oeste como el meridiano central y el ecuador como latitud de referencia. El grado en que los factores taxonómicos y geográficos se involucran fue investigado en dos formas: Ploteando las medias observadas de tolerancia a las heladas en una cuadrícula contra la cantidad relativa de observaciones de las nueve especies de papa más tolerantes a las heladas en esa celda. Y ploteando la disminución en la tolerancia media a las heladas en una celda de la cuadrícula cuando no se consideran las especies mas tolerantes. Hay una fuerte asociación de la tolerancia a las heladas con las especies y en menor medida con la serie taxonómica. Hay un agrupamiento geográfico significativo de áreas con papa silvestre con niveles similares de tolerancia a las heladas. Áreas con elevados niveles de tolerancia a las heladas están en los Andes centrales y del sur del Perú, las tierras bajas y áreas adyacentes en la Argentina, y una pequeña zona en los Andes centrales de Chile (Hijmans; et al, 2003)

Otros estudios muestran la versatilidad de DIVA-GIS como herramienta de apoyo para el modelamiento de la distribución de especies, razón por la que en el marco del proyecto se adoptará como herramienta principal.

VI. Bibliografía

- **Alvarez Alonso, José. 2006.** Imágenes del Paraíso: La Reserva Nacional Allpahuayo-Mishana. 84 p.
- **Biodiversidad Mexicana. 2010.** Distribución de las Especies. <http://www.biodiversidad.gob.mx/especies/distribesp.html> Consultado 2010/04/10.
- **Benito, Blas. 2007.** Modelos de Distribución de Especies (I). Introducción. <http://siguiendoelcambio.blogspot.com/2007/10/modelos-de-distribucin-de-especies-i.html> Consultado 2010/03/26
- **Benito de Pando, B. y Peñas de Giles, J. 2007.** Aplicación de modelos de distribución de especies a la conservación de la biodiversidad en el sureste de la Península Ibérica”, GeoFocus (Artículos), nº 7, p. 100-119, ISSN: 1578-5157
- **Carpenter, G.; Gillison, A. N.; Winter, J. 1993.** DOMAIN: a flexible modelling procedure for mapping potential distributions of plants and animals. Biodiversity and Conservation 2: 667-680
- **Cayuela, L; Golicher, D. J.; Newton, A. C.; Kolb, M.; de Albuquerque, F. S.; Arets, E. J. M. M.; Alkemade, J. R. M. and Pérez, A. M. 2009.** Species distribution modeling in the tropics: problems, potentialities, and the role of biological data for effective species

conservation. *Tropical Conservation Science* Vol. 2(3):319-352. Disponible en línea: www.tropicalconservationscience.org

- **Encarnación, C. F.; Kalliola, R. y Rodríguez, F. 2004** Diversidad de Vegetación de la Amazonía Peruana Expresada en un Mosaico de Imágenes de Satélite. Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana – IIAP. Proyecto Diversidad Biológica de la Amazonía Peruana – BIODAMAZ. Iquitos - Peru
- **Espinosa Organista, D.; Aguilar Zuñiga, C.; Escalante Espinosa, T. 2001.** Endemismo, Areas de Endemismo y Regionalización Biogeográfica. In.: Llorente-Bousquets, Jorge y Morrone, Juan J. Eds. Introducción a la biogeografía en Latinoamérica: Teorías, Conceptos, Métodos, y Aplicaciones. http://books.google.com.pe/books?id=dhcakHP1fAYC&printsec=frontcover&dq=introduccion+a+la+biogeografia+en+latinoam%C3%A9rica&source=bl&ots=3u0VsJrADS&sig=x97rUMq_CLh8Ha6VW-FTsjae9nI&hl=es&ei=syLGS-2_GYbW9AT_tMcmDg&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=6&ved=0CCwQ6AEwBQ#v=onepage&q&f=false. Consultado el 2010/03/26
- **Fishwick, Paul A. 2010.** Computer Simulation: The Art and Science of Digital World Construction. <http://www.cise.ufl.edu/~fishwick/introsim/paper.html>. Consultado el 2010/04/08.
- **Ganeshiah, K. N.; Barve, N.; Nath, N.; Chandrashekara, K.; Swamy, M.; Shaanker, R. U. 2003.** Predicting the potential geographical distribution of the sugarcane woolly aphid using GARP and DIVA-GIS. *Current Science* 85(11):1526-1528.
- **Goodchild, M. F. 2002.** Preface. In: Scott, J. M.; P. J. Heglund; M. L. Morrison; J. B. Haufler; M. G. Raphael; W. A. Wall; F. B. Samson (eds.). Predicting species occurrences: issues of accuracy and scale. 874 p. http://books.google.com.pe/books?id=P1gylbUGvOsC&printsec=frontcover&dq=scott+predicting&hl=es&ei=_bTJTOWbHoWCIaEoitWSAQ&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=1&ved=0CCcQ6AEwAA#v=onepage&q&f=false
- **Grant, William E. 2001.** Ecología y Manejo de Recursos Naturales: Análisis de Sistemas y Simulación / William E. Grant, Sandra L. Marín, Ellen K. Pedersen. San José, C. R.: IIAC. 340 p.
- **Hijmans, R. J.; Jacobs, M., Bamberg, J. B.; Spooner, D. M. 2003.** Frost tolerance in wild potato species: Assessing the predictivity of taxonomic, geographic, and ecological factors. *Euphytica* 130: 47–59,
- **Hijmans, R. J.; Guarino, L.; Cruz, M.; Rojas, E. 2001a.** Computer tools for spatial analysis of plant genetic resources data 1. DIVA-GIS. *Plant Genetic Resources Newsletter*, 127: 15-19.
- **Hijmans, R. J.; Spooner M. 2001b.** Geographic Distribution of Wild Potato Species. *American Journal of Botany* 88(11): 2101–2112
- **Hirzel, Alexandre, 2009.** Biomapper: A GIS-toolkit to model ecological niche and habitat suitability. <http://www2.unil.ch/biomapper/enfa.html> Consultado el 2010/02/17
- **Jarvis, A.; Ferguson, M. E.; Williams, D. E.; Guarino, L.; Jones, P. G.; Stalker, H. T.; Valls, J. F. M.; Pittman, R. N.; Simpson, C. E.; Bramel, P. 2003.** Biogeography of Wild *Arachis*: Assessing Conservation Status and Setting Future Priorities. *Crop Science*. 43:1100–1108.
- **Josse, C.; G. Navarro; F. Encarnacion; A. Tovar; P. Comer; W. Ferreira; F. Rodriguez; J. Saito; J. Sanjurjo; J. Dyson; E. Rubin de Celis; R. Zarate; J. Chang; M. Ahuite; C. Vargas; F. Paredes; W. Castro; J. Maco y F. Reategui. 2007.** Sistemas

Ecológicos de la Cuenca Amazónica de Perú y Bolivia: Clasificación y Mapeo. NatureServe. Arlington. Virginia. EE. UU.

- **Lahoz-Beltrá, Rafael. 2004.** Bioinformática: simulación, vida artificial e inteligencia artificial. 620 p. <http://books.google.com.pe/books?id=1Lxt1Eviy8cC&pg=PP1&dq=Lahoz-Beltr%C3%A1+Bioinformatica+Simulacion&cd=1#v=onepage&q&f=false> Consultado el 2010/03/05.
- **Lux y Sydow. 2005.** Environmental Modelling. ERCIM News. On Line 61: 10. Abril 2005.
- **Naoki, Kazuya; M. Isabel Gómez; Ramiro P. López; Rosa I. Meneses; Julieta Vargas. 2006.** Comparación de modelos de distribución de especies para predecir la distribución potencial de vida silvestre en Bolivia. Ecología en Bolivia, 41(1): 65-78, Julio de 2006.
- **Olson & Dinerstein. 2002.** The Global 200: Priority Ecoregions for Global Conservation. Annals of the Missouri Botanical Garden 89: 199–224.
- **Olson & Dinerstein. 1998.** The Global 200: A Representation Approach to Conserving the Earth's Most Biologically Valuable Ecoregions. Conservation Biology 12(3): 502-515
- **Phillips, S. J.; Anderson, R. P.; Schapire, R. E. 2006.** Maximum entropy modeling of species geographic distributions. Ecological Modelling 190: 231–259
- **Pidwirny, M. 2006.** Abiotic Factors and the Distribution of Species. In: Fundamentals of Physical Geography, 2nd Edition. e-Book. <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/9e.html> consultado 2010/10/11
- **Ramírez Mella, Jennie. 2007.** Principios de Biogeografía. Biogeografía, Marzo 2007, Volumen: s/v. Edición On-Line. <http://cremc.ponce.inter.edu/3raedicion/articulo5.htm>. Consultado 2010/04/05
- **Sengbusch, Peter v. 2003a.** Cybernetics: Systems, Control, Information and Redundancy. <http://www.biologie.uni-hamburg.de/b-online/e15/15.htm#system>. Consultado 2010/02/18
- **Sengbusch, Peter v. 2003b.** How Do You Analyze Ecosystems?. <http://www.biologie.uni-hamburg.de/b-online/e54/54b.htm>. Consultado 2010/02/18
- **Stockwell, D.; Peters, D. 1999.** GARP modelling system: problems and solutions to automated spatial prediction. International Journal of Geographical Information Science, 13(2): 143-158
- **Sydow, A. 1998.** Environmental Modelling and Simulation Research. ERCIM News. On Line 34: 8. Julio 1998.
- **Van Dyke, Fred. 2008.** Conservation Biology: Foundations, Concepts, Applications. http://books.google.com.pe/books?id=Evh1UD3ZYWcC&printsec=frontcover&dq=Van+Dyke,+Fred+Conservation+Biology+Foundations,+Concepts,+Applications&hl=es&ei=AMikTOrmLIL98Abf8Kj-AQ&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=1&ved=0CCoQ6AEwAA#v=onepage&q&f=false