

## Model for mycorrhizal, soil and climate conditions analysis on productivity in Colombian bamboo forest.

### Modelo para el análisis de los parámetros edafoclimáticos y condición micorrizal sobre la productividad de Guaduales naturales en Cundinamarca-Colombia

Bryann Esteban Avendaño-Uribe, BSc<sup>1,2</sup>, Lucía Ana Díaz M.Sc<sup>1</sup>, Daniel Castillo-Brieva cPh.D<sup>2</sup>. <sup>1</sup>Facultad de Ciencias Básicas- <sup>2</sup>Facultad de Estudios Ambientales y Rurales.

Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá-Colombia.

E-mail correspondencia: [b.avendano@javeriana.edu.co](mailto:b.avendano@javeriana.edu.co)

--Recibido para revisión 2012, aceptado fecha, versión final 2012--

**Resumen**—Este documento presenta un modelo dinámico para explicar la productividad en número de Guaduas por hectárea (ha) al año, que responden a las características exigidas del mercado para el aprovechamiento del material vegetal de los guaduales naturales. Se utilizaron las variables del suelo, clima y condición micorrizal evaluadas en el proyecto: “*Manejo Integrado del cultivo de la guadua, establecido bajo sistemas de producción limpia, en regiones con potencial productor del departamento de Cundinamarca, Colombia*”. Se simularon las condiciones de dos fincas en el municipio de Pacho, Cundinamarca región andina de Colombia. Como resultado, el modelo logró ser una herramienta útil en la predicción de posibles lugares aptos para el cultivo de la guadua. Permitiendo integrar las características de sitio y la actividad de los hongos de micorriza asociados naturalmente a la *Guadua angustifolia* Kunth, para estimar de manera acertada su influencia en la productividad de guaduales naturales útil para productores y campesinos en la región.

**Palabras Clave**— Ecología de Micorrizas, Guadua, Modelamiento dinámico, Propiedades del suelo, Silvicultura.

**Abstract**— This paper presents a dynamic model to explain the productivity by the number of culms per hectare (ha) per year of Guadua, that correspond to the required characteristics of the market for the use of plant material from natural bamboo forest. We used the variables of soil, climate and mycorrhizal condition evaluated in the project: “*Integrated management of bamboo crop, established under clean production systems in regions with potential producer of the department of Cundinamarca, Colombia.*” Conditions were simulated in two farms in the town of Pacho,

Cundinamarca an Andean region of Colombia. As a result, the model was able to be a useful tool in predicting potential sites for the cultivation of bamboo. Allowing integrate site features and activity of mycorrhizal fungi associated naturally to *Guadua angustifolia* Kunth, rightly to estimate their influence on the productivity of natural bamboo forest useful for producers and farmers in the region.

**Keywords**- Bamboo, Forestry, Mycorrhizal Ecology, Modeling soil properties, System Dynamics.

#### INTRODUCCIÓN

Colombia ocupa el segundo lugar en biodiversidad de bambú en Latinoamérica [1]. Dentro de las bambusoides nativas con mayor representación en los andes colombianos, está la *Guadua angustifolia* Kunth (Guadua), caracterizada por crecer en un 90% de manera natural, en los departamentos de Norte de Santander, Quindío, Risaralda, Cauca, Valle del Cauca, Antioquia, Huila, Nariño y Cundinamarca [2]. La Guadua ha sido reconocida también por su importancia ecológica como controladora de la erosión del suelo, estabilidad, mantenimiento y protección de recursos hídricos, aporte en cobertura relevante para la captura de carbono, propiedades mecánicas para la construcción, elaboración de artesanías, entre otras. Su valor como recurso renovable y la capacidad de sustituir especies madereras con las ventajas de un cultivo de bajo requerimiento, rápido crecimiento y amable con el mosaico de paisajes culturales, la proyectan como el acero natural en el mercado internacional ([3] [4]).

En otras regiones de Colombia como el eje cafetero, se han documentado aspectos legales, técnicos y científicos de la cadena productiva de la Guadua, su industrialización y manejo [4]. Sin embargo, a pesar de ser reconocida como un elemento de la cultura de la región andina, y a su vez como un recurso de alto valor por sus servicios ecosistémicos, no suele verse reflejado este pensamiento en el manejo que se le da a la especie [5]. En Cundinamarca, departamento con potencial productor, se han abordado estudios a nivel técnico-científicos que incluyen la caracterización climática, edáfica y biológica de rodales naturales para su manejo dentro de iniciativas silviculturales en la región [6]. Ahora es necesario, integrar los resultados obtenidos hasta el momento a estrategias que permitan establecer lugares aptos para el cultivo de la guadua, como base para el desarrollo de la cadena productiva e insumo en la toma de decisiones del uso y aprovechamiento del recurso en la región [1].

En trabajos previos se han caracterizado guaduales del eje cafetero con regímenes de aprovechamiento, estudios que incluyen evaluación de variables de crecimiento y edafoclimáticas ([6], [7], [8]). No obstante, un aspecto sobre la ecología de la Guadua que no se a tenido en cuenta en estos estudios, es su capacidad de formar simbiosis con hongos de micorriza arbuscular ([9], [10]). La Guadua forma esta simbiosis de manera natural, y la presencia de estos hongos ha sido reportada en suelos guaduales del país ([11], [7], [6]). Pese a estos avances, aún no se cuenta con una propuesta metodológica que integre las variables edáficas, climáticas y de condición micorrizal para explicar la dinámica de su interacción y cómo afecta en la productividad de guaduales naturales en Cundinamarca.

Los modelos dinámicos basados en datos experimentales pueden ser una alternativa para explicar a nivel ecológico la productividad de guaduales y su interacción con diferentes variables [12]. Estos estudios pueden ser útiles para predecir el comportamiento de ciertos parámetros en los guaduales bajo condiciones edafoclimáticas y biológicas particulares. Los resultados que se generen a partir de dichos

modelos, avalan la elaboración de planes de manejo y el aprovechamiento responsable, activando la economía local y con ello, la conservación de este recurso en la región.

Esta investigación pretende apoyar una de las fases finales del programa de investigación "*Manejo Integrado del cultivo de la guadua, establecido bajo sistemas de producción limpia, en regiones con potencial productor del departamento de Cundinamarca*" financiado por la Pontificia Universidad Javeriana, Geoambiente Ltda. y la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca en el marco de los programas de investigación sobre cadenas productivas del Ministerio de Agricultura y Desarrollo rural en la plaza abierta para proyectos de investigación I+D en Colombia.

Se propone generar un modelo para explicar la productividad de los guaduales naturales en términos del número de culmos aprovechables por hectárea al año, es decir, aquellos tallos cuyo diámetro a la altura del pecho (DAP) sea mayor a 15 centímetros, valor contemplado para materiales de calidad que suplan la demanda del mercado de construcción y artesanías [13]. El objetivo es analizar a través de un modelo conceptual la interacción de variables edáficas, climáticas y de condición micorrizal con la productividad de guaduales naturales en municipios con potencial productor del departamento de Cundinamarca-Colombia.

## METODOLOGÍA

### 1. Toma de datos

Este trabajo consistió en la exploración de las relaciones entre las variables edáficas, climáticas y la condición micorrizal con la productividad de guaduales del departamento de Cundinamarca. Las variables provienen de las medidas tomadas en el marco del proyecto "*Manejo Integrado del cultivo de la guadua, establecido bajo sistemas de producción limpia, en regiones con potencial productor del departamento de Cundinamarca*"; liderado por el grupo de Investigación Asociación Suelo-Planta-Microorganismo de la Unidad de Biotecnología Vegetal de la Pontificia Universidad Javeriana.

Se utilizaron las bases de datos disponibles de las variables medidas con el establecimiento de un

diseño experimental en dos rodales naturales de Pacho, capital de la provincia de Rionegro (La Cebú-La Miquera, 05°07'N 74°09'O). Estos rodales tenían 2500-3500 m<sup>2</sup> divididos en parcelas de 100 m<sup>2</sup>, cada una contaba con ocho (8) subparcelas elegidas al azar para tomar los datos pertinentes del estudio entre los años 2008 y 2011 con periodicidad semestral. Se tomaron mediciones de las variables de crecimiento de la planta, variables fisicoquímicas del suelo, datos del clima medidos en campo y variables correspondientes a la condición micorrizal de la Guadua.

Se estudió cada relación posible de la totalidad de las 37 variables medidas, por medio de un análisis factorial<sup>1</sup>, se seleccionaron las variables con mayor varianza en el análisis de componentes principales y se realizaron correlaciones múltiples con rangos de Spearman, lo que permitió elegir las variables para proceder con la fase Modelamiento.

## 2. Modelamiento

### 2.1. Modelo conceptual

Se elaboró un modelo conceptual siguiendo la metodología del protocolo propuesto por Grant y colaboradores (2008) [14]. Para esto, primero se analizó la viabilidad del problema para ser resuelto a través de un ejercicio de modelamiento, luego se realizó la exploración y conceptualización de los datos para reconocer, definir y formular el problema y sistema a modelar. Con esta información se elaboraron diagramas de niveles<sup>2</sup> que permitieron establecer las relaciones de causalidad entre las variables e identificar las relaciones entre los componentes del sistema. Después se representó el modelo causal<sup>3</sup> y se describieron los patrones y comportamiento esperado del modelo, utilizando la literatura que explicara la relación entre las variables.

El modelo se organizó en dos sectores, el primero explica la relación entre la dinámica de las variables edafoclimáticas y condición micorrizal con la variable de crecimiento, que para el caso de

las mediciones experimentales fue el DAP. Por lo tanto, el modelo simula el efecto que tienen estas variables sobre la variable respuesta: *Productividad 1* o crecimiento en DAP.

El segundo sector muestra la dinámica de cambio de las Guaduas en sus cinco estados de desarrollo siguiendo a Castaño [15], utilizando como condición inicial el número de Guaduas en estado renuevo, juvenil, maduro, sobremaduro y seco del primer muestreo y calculando una tasa de cambio que para cada caso cambia dadas las características de crecimiento de la especie. En su orden las tasas de referencia corresponden a: 1 semestre paso de Renuevo-Juvenil, 1.8 semestres de Juvenil a Maduro, 2.8 semestres de Maduro a Sobremaduro y 1.5 semestres de Sobremaduro a Seco.

En este mismo sector el modelo selecciona las Guaduas que cumplen con el criterio de utilidad guiado por el sector 1 o *Productividad 1*, es decir, diámetro a la altura del pecho mayor a DAP y se propuso una ecuación para esta condicional. Luego las Guaduas que logran ser seleccionadas en este filtro del modelo, se acumularon en la segunda variable respuesta *Productividad 2*. Finalmente se generaron variables útiles para el análisis de este ecosistema como la productividad al año, la productividad por estado de desarrollo y la unión de ambos sectores en la productividad del Guadual.

### 2.2. Modelo matemático

Luego de elaborar el modelo en conceptual<sup>3</sup>, se representaron los elementos y las relaciones del diagrama por medio de un lenguaje formal o matemático. Para ello se elaboró el diagrama de forrester del sistema. Esto permitió identificar las funciones formales de las ecuaciones en el modelo, definiendo y ordenando las variables a relacionar en términos de la dependencia e independencia de las variables en cada relación [16].

Para hallar cada efecto de estas variables sobre las otras, los datos de cada variable se organizaron en una tabla, teniendo en cuenta la dimensión espacio-temporal del dato del mayor al menor valor y se eliminaron los valores repetidos. Con el fin de determinar el efecto de cada variable independiente (V.I) sobre la variable dependiente

<sup>1</sup> Minitab® y R Project for Statistical Computing V 2.15

<sup>2</sup> Junto con diagramas causales preliminares diseñados en VENSIM®

<sup>3</sup> Se utilizó *i-think* STELLA® (Modeling & Simulation Software).

(V.D) [16] y poder llevarlas al modelo, se llevó a cabo la metodología propuesta por Castillo (2007) [17], donde se tiene como premisa que los valores que se asignarán al efecto (Influencia de la V.I sobre V.D) no pueden ser mayor al valor máximo, ni tampoco ser menor al valor mínimo que toma la variable. Por lo tanto se sugirió la siguiente fórmula para cada una de las relaciones propuestas:

$$(1) y_{real} = (\tilde{y} * Efectox)$$

Donde  $y_{real}$  corresponde a la V.D y  $\tilde{y}$  el valor de su media. En la ecuación (1)  $y_{real}$  puede tomar los mismos valores que toma la variable  $\tilde{y}$ , ya sea el máximo, el mínimo o la media. El resultado de la operación  $\tilde{y} * EfectoX$  (efecto que tiene la V.I (y) sobre  $y_{real}$ ), no debe superar a la media de la variable de interés  $\tilde{y}$ . Para conocer cada efecto, se despejó de la ecuación (1) el  $EfectoX$  y se determinó con los valores de  $y_{real}$ , tanto los valores mínimo, como valores máximo y medio<sup>4</sup> respectivamente. A continuación las ecuaciones utilizadas para cada variable:

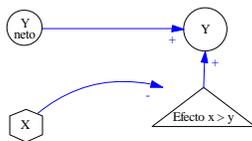
$$(2) Efectox = \frac{y_{real}}{\tilde{y}}$$

$$(2.1) Efectox_{Máx} = \frac{y_{real}}{y_{Máx}};$$

$$(2.2) Efectox_{Min} = \frac{y_{real}}{y_{Min}};$$

$$(2.3) Efectox_{Med} = \frac{y_{real}}{y_{med}}$$

Para cumplir la condición del efecto, partiendo de la ecuación (2) se logró estimar cada valor que toma el  $EfectoX$  para los valores de  $\tilde{y}$  (Máximo, Mínimo y Media), siguiendo las ecuaciones 2.1, 2.2 y 2.3. Estos valores se organizaron y finalmente se ingresaron al software de modelamiento<sup>3</sup> a manera de enlaces de relación (Figura 1), siguiendo el modelo conceptual elaborado para simular cada efecto y determinar las conexiones entre las relaciones del modelo.



**Figura 1.** Representación esquemática del algoritmo que se esperaba cumplieran cada una de las relaciones establecidas para cada variable.

### 2.3. Evaluación del modelo

Para evaluar el modelo se ejecutó una línea base de simulación con las variables seleccionadas. Los valores de cada una fueron elegidos de manera que la salida cumpliera el valor esperado según los estudios experimentales previstos para otras regiones del país ([3], [15]), es decir, aquellos valores cuya simulación permitiera una productividad de 1800 a 2500 Guaduas por hectárea al año. Luego se compararon las correspondencias del comportamiento del modelo con sus patrones esperados y la fiabilidad de las proyecciones del modelo con los datos del sistema real, evaluado en la fase experimental del proyecto [18], [19].

#### Supuestos o asunciones del modelo

Los supuestos del modelo condicionan su interpretación y consecuente validación. Por ello tanto a nivel teórico, como a nivel práctico el modelo asume que:

- En los guadales de estudio no hay intervención humana.
- Un sistema cerrado en términos poblacionales, no migran ni emigran plantas del sistema.
- Existe una linealidad en los eventos de desarrollo ininterrumpidos, es decir, se pasa de renuevo a juvenil, maduro, sobremaduro y seco bajo una tasa promedio que se mantiene en el tiempo de estudio. Los tiempos ya definidos para el desarrollo de la Guadua [15], se pasaron a semestre y se trabajó con esta medida.
- La diferencia topográfica del relieve en el lugar de estudio, no influye en las variables directamente involucradas en la disponibilidad de nutrientes.
- Las plantas toman nutrientes y los metabolizan por síntesis química aumentando su biomasa, es decir un comportamiento similar en todas las plantas estudiadas respecto a su fisiología de nutrición [20]. Por ello es posible inferir que a medida que aumentan los nutrientes en cierta medida aumenta la formación de biomasa y con ello variables de crecimiento en términos de DAP.
- Los hongos de micorriza arbuscular se comportan fisiológica y ecológicamente similar en el tiempo de estudio y que a pesar de la relación tripartita o interacción con otros microorganismos

<sup>4</sup> Cuyo valor es un estimado del promedio de los datos.

o elementos de la rizósfera, la actividad micorrizal se le atribuye únicamente a los hongos asociados.

- Un tiempo cero que es el inicio del estudio (Marzo de 2009), es un rodal maduro y contiene Guaduas en todos los estados de desarrollo.

- Siguiendo a [21] el estado de desarrollo "Seco" no está en proceso de crecimiento, ni se encuentra fisiológicamente activo por lo que se asume en el modelo que en este estado no hay acumulación de nutrientes.

- Las guaduas muestreadas para tomar los datos no influyen en la dinámica natural de las otras guaduas o del gradual en general.

- En el gradual no hay plantas que afectan significativamente el modelo, por lo que también en parte es cerrado.

- Sólo se tiene en cuenta las variables de crecimiento aéreas de la Guadua y se discriminan aquellas asociadas con el sistema radical que suelen ser relevantes en términos de producción de biomasa.

#### 2.4. Simulaciones

Se efectuaron 12 simulaciones de prueba al modelo para determinar la sensibilidad de las proyecciones y se observaron los cambios en los valores de los parámetros más importantes. Luego se realizaron dos (2) simulaciones experimentales sucesivas para la validación del modelo, una correspondiente a la línea base, que corresponde a los siguientes valores en La Cebú, subparcela 8:

Bajo la misma cantidad de nutrientes iniciales: (P) = 20,23; (N) = 0,61; (K)= 0,24; (Mg)= 1.3; (Ca)= 31,2; (Na)= 0,08.

- pH ácido (6.2)
- Temperatura ambiental (20.6 °C)
- Conductividad eléctrica (325  $\mu$ S/cm)
- Bases Totales (36,99 meq/100gr.)
- Agregación del suelo (90,67%)
- Humedad de Campo (26,37%)
- Relación carbono-nitrógeno C/N (11,21)
- Micorrización [M%] (14,45%)
- Micorrización [a%] (21,24%)

Para la segunda simulación se cambiaron los valores de las variables teniendo en cuenta

aquellos valores experimentales que contrastaban con los definidos en la línea base y cumplían además con el requerimiento de DAP exigido en el mercado [13].

Bajo la misma cantidad de nutrientes iniciales: (P) = 20,23; (N) = 0,61; (K)= 0,24; (Mg)= 1.3; (Ca)= 31,2; (Na)= 0,08

- pH básico (7.2)
- Temperatura ambiental (26.3 °C)
- Conductividad eléctrica (758  $\mu$ S/cm)
- Bases Totales (44,70 meq/100gr.)
- Agregación del suelo (46,37%)
- Humedad de Campo (54,13%)
- Relación carbono-nitrógeno C/N (15)
- Micorrización [M%] (55,7%)
- Micorrización [a%] (62,43%)

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 1. Análisis factorial

Dentro del análisis factorial por medio de componentes principales usando el método de rotación Oblimin directo [22], en los seis factores que aportan el 73,74% de la varianza del estudio (Alfa Cronbach 0,795), se encontraron las variables seleccionadas para la simulación del modelo: El factor 1 con menos explicación de la varianza (27,43%) pero contiene la mayor parte de las variables incluye la Capacidad de Intercambio Catiónico, Nitrógeno total, Bases totales, Calcio, Conductividad eléctrica y Humedad de campo. El factor 2 con el (41,71%) de explicación contiene las variables pH y Fósforo disponible, el factor 3 explica el (52,24%) de la varianza con la Temperatura ambiental y Estado de agregación. El factor 4 explica el (60,87%) de la varianza con las variables intensidad de micorrización (M%) y (m%) y la frecuencia de Micorrización (F%), el factor 5 constituido por el Potasio y el Sodio explica el (67,77%) y el factor 6 contiene la Altura, pero esta no se tuvo en cuenta como variable de crecimiento dado que los objetivos del estudio apuntaron al DAP como variable respuesta [23].

Para los objetivos del estudio se analizaron en el modelo dinámico las siguientes variables: pH es la acidez ó Potencial de hidrogeniones. Este factor es

relevante en la dinámica del suelo [24], dado que su variación genera cambios en la disponibilidad de los nutrientes y componentes del suelo (Spearman, Rho. 0,701) (Figura 2).

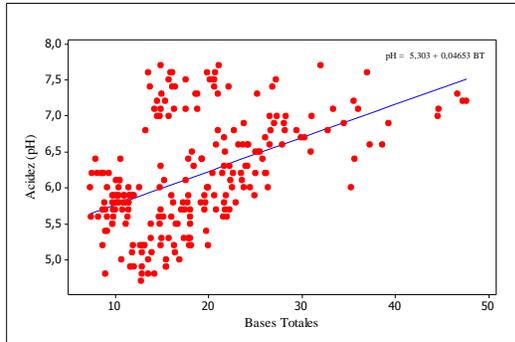


Figura 2. Correlación pH - Bases totales (p-val. 0,000).

La temperatura ambiental que corresponde al cambio de energía calórica que sucede en la atmósfera, si se trata de un ecosistema, se mide el contenido calórico inmediato al lugar (°Celsius) y la humedad de campo o suelo que se refiere a la cantidad de agua que contiene el suelo, define la mayoría de las reacciones químicas dependientes de solventes como el agua, también gobierna las reacciones eléctricas del suelo y los balances iónicos que influyen en la dinámica de nutrientes del suelo [25]. Dada la relación indirecta entre la temperatura del ambiente, el suelo y la humedad del mismo, en el estudio existe una monotonía negativa (Spearman, Rho. 0,203), donde la humedad es mayor a medida que la temperatura llega a la media en el Guadual (Figura 3).

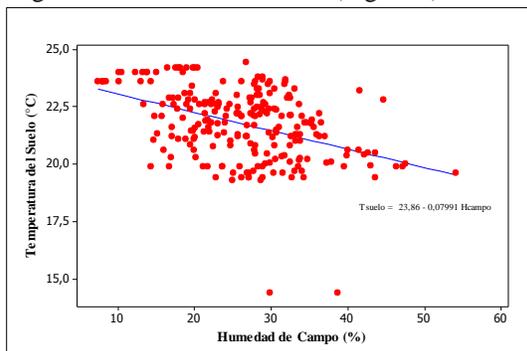


Figura 3. Correlación TS- Hum. Campo (p-val. 0,002).

La relación Carbono-Nitrógeno (C/N) refiere a la cantidad de carbono y cantidad de nitrógeno que en proporción hay en una muestra de suelo (100 gramos), es un parámetro que evalúa la calidad de del recurso y determina el grado de mineralización

de la materia orgánica que existe en el suelo ([24] [26]). Concuerda con los resultados (Spearman, Rho. 0,492), y a su vez es un determinante de la actividad de los hongos de micorriza que dependen de factores como la humedad para su desarrollo [27] (Figura 4).

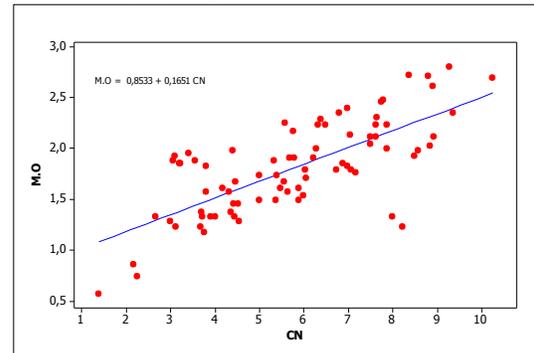


Figura 4. Correlación M.O- C/N (p-val. 0,001).

Por otro lado, características como la conductividad eléctrica y la agregación del suelo están relacionadas (Spearman, Rho -0,765, p-val. 0,000), en términos de la concentración total de componentes ionizados en el suelo y la disponibilidad de las bases totales [28]. Así, la presencia en combinación de cationes: Calcio, Magnesio, Sodio, Potasio y aniones como carbonatos, cloruros y sulfatos, permitirá correlacionar la conductividad de iones con la posibilidad de conducir nutrientes en el suelo para las plantas [29].

Las variables de la condición micorrizal, que responde respectivamente a M% que es la medida de la intensidad con que la planta es micorrizada y cuenta todo el sistema radical analizado y a% que refiere a la abundancia de enortijados de hongos de micorriza presentes sólo en los fragmentos micorrizados del sistema radical ([30], [8]). Ambas son variables relevantes dado que la micorriza es una asociación mutualista entre hongos del suelo y el sistema radical de las plantas, en donde existe por lo menos una estructura funcional para el beneficio mutuo específico, tanto en el aporte del hongo a la movilización de nutrientes hacia la planta (principalmente fósforo), como de la planta hacia el hongo, en términos de otorgar carbono combinado para su consumo ([31] [32] [33]). En el estudio no se evidenció una correlación entre estas variables de condición micorrizal con el carbono presente en el suelo. No obstante, sí se

observó relación positiva entre la cantidad de Carbono y materia orgánica con la Glomalina (Spearman, Rho. 0,516, p-val. 0,000) y el micelio externo (Spearman, Rho. 0,676, p-val. 0,000). Estas variables no entran al modelo, sin embargo se recomienda incluirlas como parámetros relevantes en la dinámica de interacción de las micorrizas con las variables edáficas, dada la propiedad su capacidad de ofrecer agregación y estructura al suelo ([28], [10], [34], [35]).

El grado de micorrización de la Guadua se determina con el porcentaje de micorrización y para que la estimación intrarradical sea precisa, se tienen medidas calculadas mediante el software MycoCalc®, tanto la intensidad de Micorrización en el sistema radical (M%); la abundancia sólo en los fragmentos micorrizados (a%) ([8], [31]). La Guadua forma micorriza arbuscular tipo intermedia, evidenciado por la presencia de arbusculos y ensortijados, es decir características tanto de tipo Arum, como Paris ([36], [10]).

## 2. Estructura del Modelo

El modelo conceptual que se elaboró (Figura 5) muestra en un primer sector, la dinámica de nutrientes en interacción con las variables edáficas, climáticas y condición micorrizal que afecta finalmente la disponibilidad de los mismos y a su vez el DAP *Productividad 1*. El segundo sector correspondiente a la *Productividad 2*, que permitirá determinar el número de culmos por hectárea al año producidos y proviene de la estimación del cambio de estado de desarrollo en los culmos que pasan de tener una característica determinada de DAP a otra, por efecto del sector 1 del modelo, previamente explicada.

En el modelo se logran apreciar las interacciones entre las variables edáficas y climáticas (Figura 5-Sector 1), que tienen un efecto calculado por la sumatoria de los efectos de cada variable, en la disponibilidad de cada nutriente (Figura 6), dispuesto en un arreglo del stock inicial: Fósforo (P), Nitrógeno (N), Potasio (K), Magnesio (Mg), Calcio (Ca) y Sodio (Na), según la ecuación:

$$(3) \text{ Disponibilidad} = \text{Nutriente}_{\text{inicial}}[\text{Nutriente}] * E1[\text{Nutriente}] * E4[\text{Nutriente}] * E2[\text{Nutriente}] * E5[\text{Nutriente}] * E6[\text{Nutriente}] * E3[\text{Nutriente}] * E7[\text{Nutriente}]$$

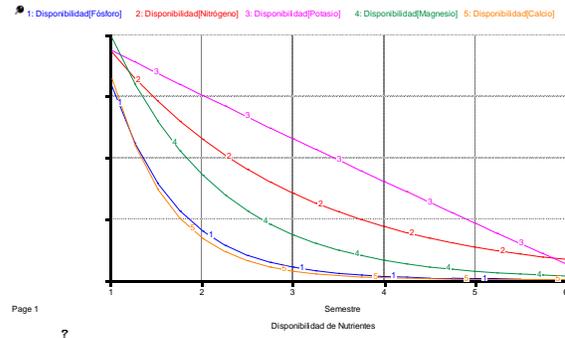


Figura 6. Efecto de las variables edáficas y climáticas sobre la disponibilidad diferencial de cada nutriente.

El análisis del efecto que tiene el pH sobre cada nutriente en el modelo (Figura 7), está relacionado con lo que se reporta en la literatura [24] y concuerda con las correlaciones de las bases totales para esta variable (Spearman, Rho. 0,701, p-val. 0,000).

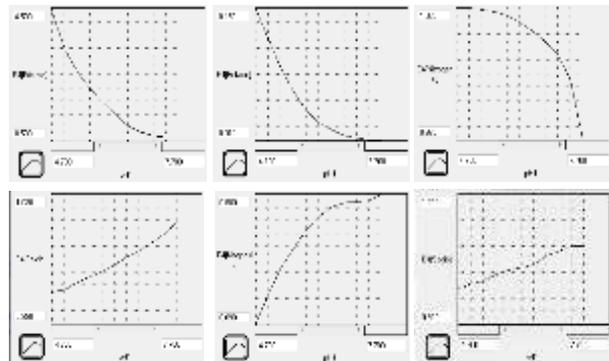
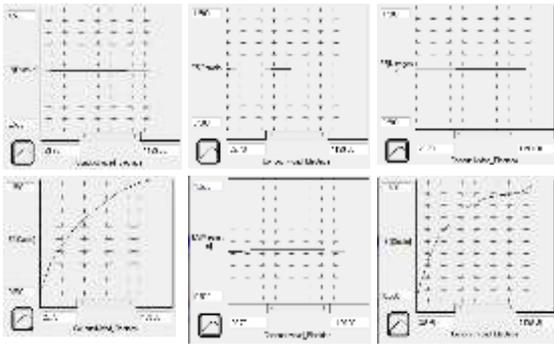


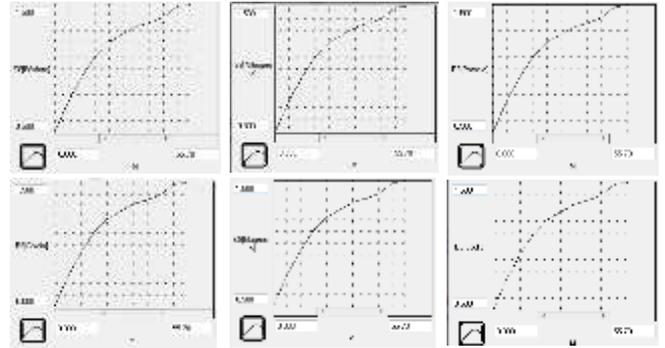
Figura 7. Efecto del pH sobre la disponibilidad respectivamente de (P, K, N, Ca, Mg y Na).

Lo mismo sucede con la agregación del suelo, donde el efecto mayor lo tiene sobre las bases intercambiables [29], y existe una alta correlación con la conductividad eléctrica (Spearman, Rho. -0,765, p-val. 0,000). Que indirectamente, se relaciona con las bases totales y la disponibilidad de los nutrientes en el suelo (Figura 8).

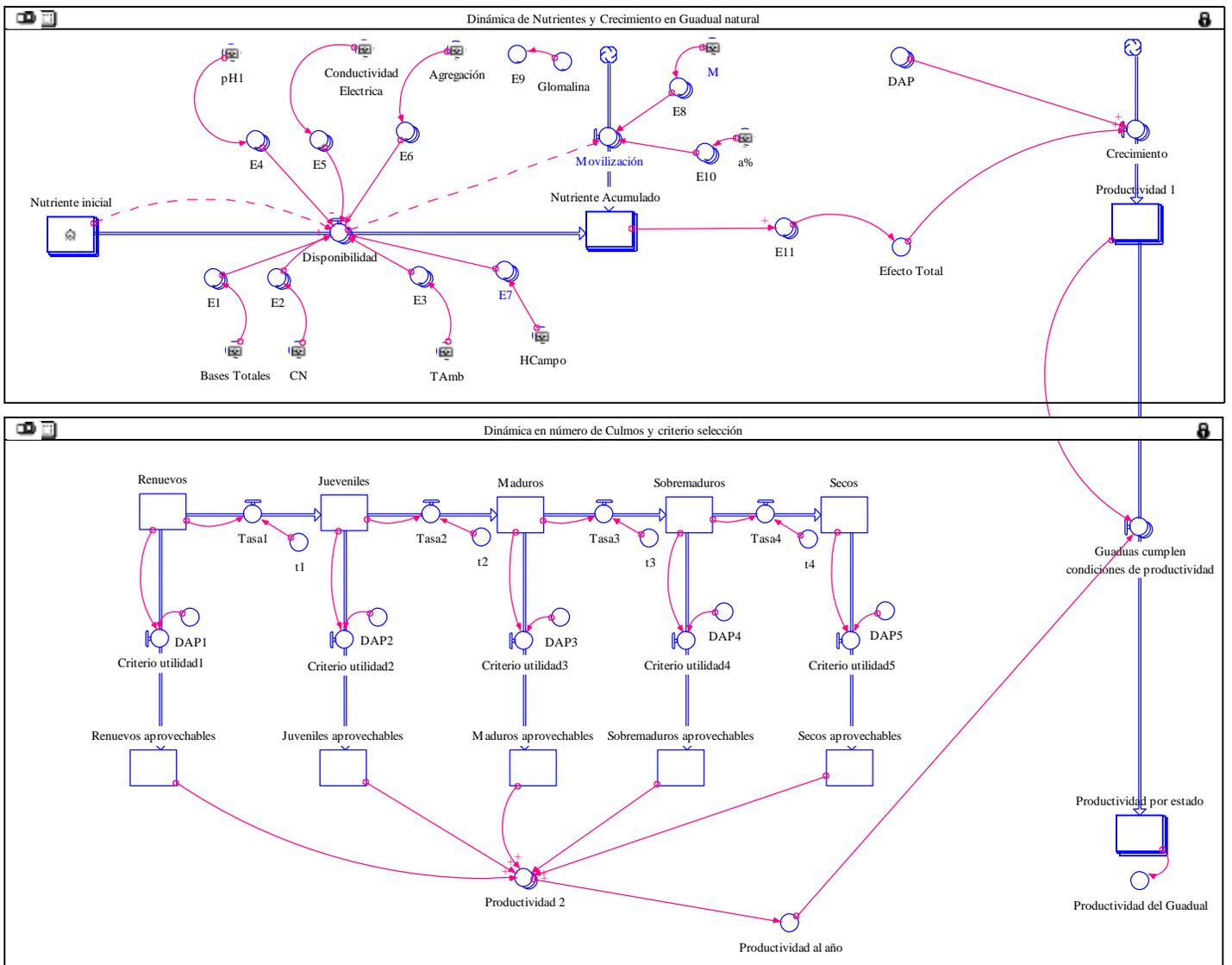
La condición micorrizal tiene un efecto adicional en la Movilización de los nutrientes (Figura 9) y esta actividad junto con la disponibilidad, interactúa en la acumulación del nutriente en el suelo, dado que, los hongos de micorriza generan una zona de depleción de nutrientes y logran solubilizarlos y dejarlos en formas disponibles para las plantas ([37], [31], [32]).



**Figura 8.** Efecto la conductividad eléctrica sobre la disponibilidad (P, K, N, Ca, Mg y Na).

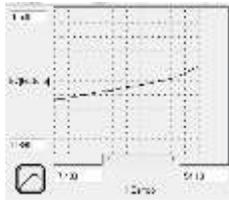


**Figura 9.** Efecto la intensidad de micorrización M% sobre la disponibilidad respectivamente de (P, K, N, Ca, Mg y Na).

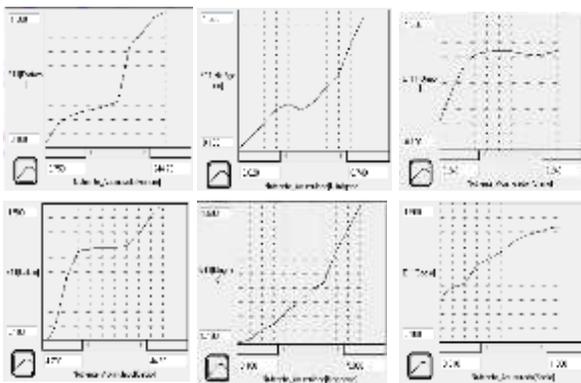


**Figura 5.** Modelo conceptual que relaciona los parámetros edafoclimáticos y la condición micorrízal con la productividad de Guaduales naturales.

Estas son algunas de las variables que interactúan a través de su efecto directo sobre la disponibilidad de los nutrientes en el modelo. No obstante, existen relaciones indirectas que permiten calcular el efecto de una variable como la Temperatura ambiental sobre la disponibilidad de algún nutriente. Esto es posible dado que existe una relación entre la Temperatura del ambiente y la humedad relativa del ambiente (Spearman, Rho. -0,705, p-val. 0,000), también entre la temperatura del ambiente y el suelo (Spearman, Rho. 0,527, p-val. 0,000). A su vez, una relación entre la humedad relativa (HR%) y la humedad de campo, que permite inferir directamente un efecto desde la temperatura del ambiente sobre la humedad del suelo y cómo afecta la disponibilidad de fósforo al afectar la condición micorrizal [38], por ejemplo (Figura 10).



**Figura 10.** Ejemplo disponibilidad de fósforo en el modelo bajo efecto de parámetros edafoclimáticos<sup>5</sup>. El efecto que tiene la acumulación de nutrientes en el modelo sobre la producción de biomasa por parte de la planta, medida en crecimiento por el diámetro a la altura del pecho [3]. Permite según las asunciones del modelo, encontrar una relación positiva en la cantidad de nutrientes con respecto a la producción de biomasa y productividad en términos del DAP de la Guadua (Figura 11).



**Figura 11.** Efecto hipotético que tendría cada nutriente sobre la biomasa (términos de DAP en Guadua).

El nutriente acumulado dado que es el efecto que tiene la movilización del nutriente sobre la disponibilidad del mismo sigue la ecuación:

$$(4) \text{ Nutriente acumulado} = \text{Disponibilidad}[\text{Nutriente}] * \text{Movilización}[\text{Nutriente}]$$

Luego dado los efectos de cada uno de los nutrientes (P, K, N, Ca, Mg y Na), se calcula el efecto en la *productividad 1* y resulta la ecuación:

$$(5) \text{ Efecto total} = (E11[P] + E11[N] + E11[K] + E11[Mg] + E11[Ca] + E11[Na]) - \text{Error} \quad (4.4)$$

A pesar de que el efecto generaría una acumulación infinita de nutrientes se tuvieron en cuenta los datos experimentales para tener rangos de los mismos máximos y mínimos de cada uno (P: 0.23-21.23meq/100gr, N: 0.01-2.61%, K: 0.24-2.24ppm, Ca: 30.2-32.2meq/100gr, Mg: 0.3-2.3meq/100gr y Na: 0.08-2.06meq/100gr) lo cual se ve en el modelo para cada nutriente inicial.

Luego la multiplicación del efecto por cada DAP inicial en tiempo cero, siguiendo los datos experimentales para cada estado de desarrollo de la Guadua que pueden ser utilizados comercialmente (Renuevo: 9.1, Juvenil: 11.2, Maduro: 11.4, Sobremaduro: 11.7, Seco: 12), permite evaluar la variable crecimiento que será la *Productividad 1*:

$$\text{Crecimiento} = \text{DAP}_{[\text{Estado desarrollo}]} * \text{Efecto total}$$

El segundo sector en la estructura del modelo (Figura 5) para simular la *Productividad 2* en número de Guaduas por hectárea al año producidas en el ecosistema, inicia con el cálculo de las tasas de cambio desde Renuevo, Juvenil, Maduro, Sobremaduro hasta Seco. El cálculo de las tasas de referencia utilizadas proviene de los trabajos previos ([15], [39]), el modelo utiliza estas tasas de referencia para calcular el paso de un estado de desarrollo a otro semestralmente con la fórmula general:

$$(6) \text{ Tasa}_{\text{estado } x \text{ a } x+1} = \left( \frac{\text{Número guaduas en estado } x}{\text{tasa referencia}_{\text{estado } x \text{ a } x+1}} \right)$$

Luego se aplica un criterio de selección para cada número de Guaduas por estado de desarrollo. En este caso, el criterio es el DAP, aquellos culmos

<sup>5</sup> Valores de la simulación de línea base.

que cumplen con las condiciones del mercado para ser tomados como culmos aprovechables, en cada estado de desarrollo [13]. Esta parte del modelo, sugiere ser la más innovadora respecto al resto de modelos sobre tasas de cambio y productividad en número de culmos en el tiempo y el espacio, dado que con el criterio de selección el modelo no solamente simula la situación del guadual en términos del número de Guaduas, sino que calcula aquellas que son útiles para hacer un aprovechamiento responsable del mismo [40]. La selección de los valores del criterio DAP están basadas en estudios previos que rescatan la importancia de un diámetro determinado para satisfacer las necesidades del mercado y se considere productivo el Guadual ([41], [42]). Dicho criterio de utilidad funciona con el condicional:

$$(7) \text{ Criterio utilidad} = IF [DAP] > 15 \text{ THEN } [Guadua \text{ aprovechable}] \text{ ELSE } [0]$$

La función condicional se cumplió así: Si el DAP de esa Guadua por estado de desarrollo es mayor a 15 cm, entonces el modelo las acumula en el número de Guaduas aprovechables, si no se multiplica por cero y el valor desaparece. De esta manera, se seleccionan las Guaduas útiles para determinar una productividad del guadual ([15] [39], [40]), y se podría hacer un inventario forestal del guadual para evidenciar su estado y así decidir si se aprovecha o no, y bajo determinado tipo de condiciones edafoclimáticas y de condición micorrizal.

El número de Guaduas sumadas como aprovechables serán la *Productividad 2* y esta sumatoria a tres años, teniendo en cuenta las asunciones del modelo, se divide en tres (3) para que la variable respuesta neta de *Productividad 2 al año* se exprese en unidades de número de Guaduas por hectárea al año:

$$(8) \text{ Productividad } 2 = \text{ARRAYSUM}[\#Guaduas \text{ aprovechables}_{(estado)}]$$

$$(9) \text{ Productividad } 2 \text{ al año} = [\text{Productividad } 2 / 3]$$

Finalmente, la productividad del guadual se calcula:

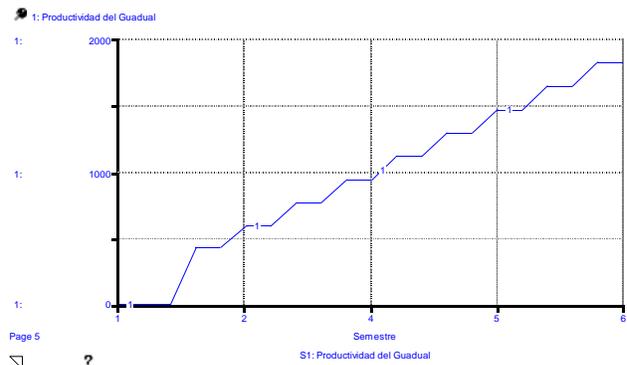
$$(10) \beta = \left[ \sum_{e=1}^6 \frac{\text{Individuos}}{\text{Subparcela/Semestre}} * \frac{1 \text{ Subparcela}}{100 \text{ m}^2} * \frac{100 \text{ m}^2}{\text{ha}} * \frac{2 \text{ semestres}}{1 \text{ año}} \right]$$

$\beta$  = Productividad del Guadual  
 Ha = Las subparcelas tienen 10x10 metros, y estos 100 metros cuadrados multiplicados por 100 metros cuadrados son el equivalente a 10000 metros cuadrados o hectárea.

Sin embargo, el modelo utiliza únicamente la ecuación (8), en función de las Guaduas que cumplen con el criterio de DAP para la simulación de la *Productividad del Guadual*.

### 3. Simulaciones.

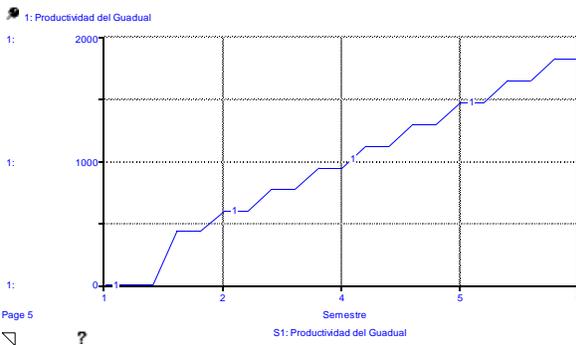
La simulación 1 (Línea base) de la cantidad de Guaduas por hectárea al año, según características del suelo, nutrientes y actividad micorrizal resultó en 1895 culmos de Guadua (Figura 12). De acuerdo con la literatura ([3], [15]), este número se encuentra en los rangos reportados para Guaduales del eje cafetero (1800-2500 Guaduas/Ha/año) según los requerimientos de diámetro exigidos para su comercialización y aprovechamiento. Por lo que se evidencia la importancia de este modelo como herramienta metodológica útil para la comprensión del comportamiento de este tipo de fenómenos



naturales [16].  
**Figura 12.** Productividad de Guaduales naturales de Pacho, simulada bajo condiciones control o línea base.

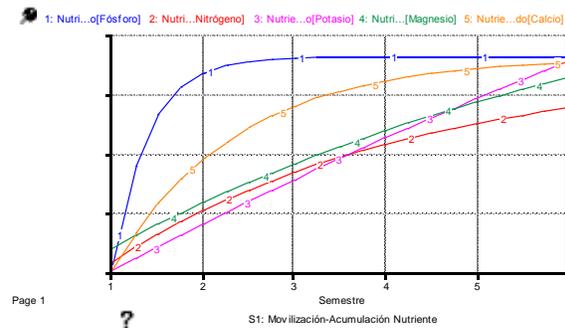
Para la segunda simulación, se obtuvo un valor de 1827 culmos de Guadua por hectárea al año (Figura 13). Esto muestra que al elaborar las simulaciones se encontraron diferencias al comparar ambos tipos de productividad con uno y

otro parámetro edafoclimático. Se encontró que la agregación del suelo, el pH y la humedad del suelo son los parámetros que tienen una mayor influencia en estas diferencias numéricas y a su vez la micorriza tipo M%, presenta un efecto diferencial a la hora de comparar el efecto de los nutrientes sobre *Productividad 1*. Esto concuerda con la literatura dado que la condición micorrizal y los parámetros de agregación del suelo son los parámetros más influyentes en la dinámica de los nutrientes en los agroecosistemas ([27], [43], [44]).



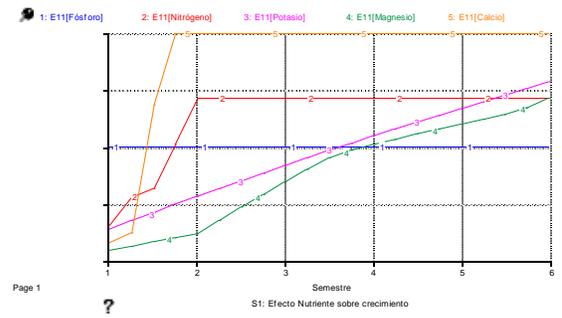
**Figura 13.** Productividad de Guadales naturales de Pacho, simulada bajo condiciones contrarias al control.

La importancia de las micorizas como efecto en el crecimiento o incremento del diámetro como variable respuesta de la *Productividad 1* se puede comparar con la simulación de la movilización y acumulación de los nutrientes (Figura 14) y extrapolar la información de cada nutriente en la simulación del efecto de cada uno en el incremento del DAP de la Guadua (Figura 15).



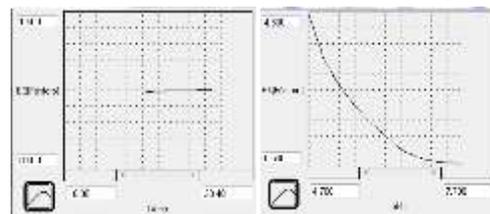
**Figura 14.** Movilización de nutrientes por efecto de los hongos de Micorriza.(Condición micorrizal M%).

Esto permite evidenciar que nutrientes como el fósforo donde aumenta la disponibilidad en mayor medida por las micorizas, al ver su efecto sobre el crecimiento de diámetro de la Guadua, es constante, lo que sugiere que existen factores adicionales que pueden estar mediando esta interacción y ser más relevantes que la actividad misma de los hongos de micorriza [45]. Se sugiere, la humedad y el pH intervenga en mayor medida dado que la mineralización de la materia orgánica al dar como resultado compuestos nitrogenados, está elevando la actividad microbiana y la carga eléctrica del suelo, permitiendo una mayor acumulación de nutrientes [46] y con ello, un aumento en el efecto que tienen sobre la variable de crecimiento.



**Figura 15.** Efecto de cada nutriente sobre la variable de crecimiento de las Guaduas (DAP).

Por otro lado, al comparar las condiciones edáficas y climáticas simuladas para la línea base respecto a la segunda simulación, se nota cambios significativos en la disponibilidad de los nutrientes con variación de parámetros edáficos como acidez o pH (Figura 16) [47], más que con la variación de los parámetros climáticos, como temperatura ambiental (Figura 17). Esto concuerda con la literatura [48], y con resultados previos simulando efectos indirectos de las variables.

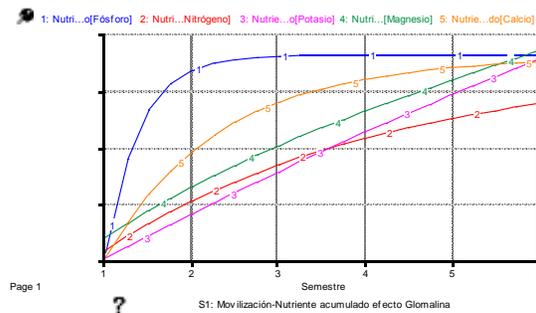


**Figura 16.** Efecto de dos parámetros diferentes (Climático y edáfico) sobre el mismo nutriente.

De manera que siguiendo con lo propuesto por la literatura ([49], [50]) las variables del suelo ejercen una presión de respuesta que permite a los nutrientes comportarse de manera diferente bajo condiciones determinadas de conductividad eléctrica, agregación, porcentaje de bases totales, humedad del suelo y pH [25].

Por otro lado, los estudios preliminares en el tema, han estado enfocados en regiones como Caldas [26], Valle del Cauca [51] y eje cafetero: Risaralda y Quindío ([3], [42], [52]). En la mayoría rescatando las propiedades del suelo, el clima, la vegetación y el aprovechamiento en guaduales tanto naturales como cultivados. Chacón (1987) llevó a cabo estudios sobre la dinámica de los guaduales elaborando un modelo estadístico para hallar regímenes de aprovechamiento enfocado en el Valle del Cauca [53], modelos como los desarrollados por David & Daza (1994), para caracterizar la dinámica poblacional de guaduales naturales en la cuenca alta del río Cauca y propuestas más recientes en el eje cafetero [54], como la construcción de un modelo con variables edáficas y climáticas para explicar la productividad [3] muestran el avance en investigación cuantitativa y son insumos para la construcción de conocimiento, en materia de modelos ecológicos para guaduales en Cundinamarca.

Existen variables como la Glomalina y el micelio eterno que no fueron incluidas en el modelo, a pesar de que entraran como factores en el análisis de componentes principales. Contrario a lo que se ha reportado, donde estas variables permiten generar mayor agregación del suelo, mejora la cantidad de nutrientes y aumenta la disponibilidad de los mismos para la Guadua ([31], [55], [56], [33]). Estas características propias de los hongos de micorriza arbuscular, cuya capacidad de generar una red que amarra el suelo y estimular una zona de depleción de nutrientes en la rizósfera de las plantas ([28], [30], [57]), a ser simuladas en condiciones de línea base y simulación contraria a esta, no se evidencia cambio en la actividad de los nutrientes (Figura 17).



**Figura 17.** Movilización de nutrientes por efecto de la Glomalina.

En este orden de ideas, dado que la condición micorrizal (M%) tuvo efecto sobre la productividad y existe un efecto acumulativo con variables edáficas y climáticas. Los estudios sobre la condición micorrizal en Guadua encuentran una micorriza tipo intermedia, donde a pesar de existir un 100% de colonización en condiciones naturales en rodales de Quindío, Valle del Cauca, Risaralda y Cundinamarca ([10] [7], [6], [8]). Sin embargo, la dependencia micorrizal es baja [58], y al integrar las variables edafoclimáticas en el modelo para explicar la productividad, hay una respuesta clara de la interacción entre las variables que logra explicar la actividad de la micorriza en los Guaduales naturales. Por esta razón, es necesario generar las condiciones necesarias para estudiar la dependencia junto con otros factores climáticos y edáficos, para afirmar que la actividad de los hongos de micorriza es moderada con respecto a la simbiosis en la Guadua. Adicionalmente, tener en cuenta factores como la biogeografía [30], la interacción con otros simbioses y la influencia neta que tendrían los hongos en la disponibilidad de nutrientes en suelos andinos, con las características estudiadas y con las adaptaciones de la Guadua a diferentes condiciones naturales [51].

## CONCLUSIÓN

El modelo funcionó como herramienta predictiva sobre la productividad de los guaduales, en términos del número de culmos por hectárea al año, que cumplieran con las condiciones de diámetro exigidas para su aprovechamiento comercial.

Al simular las condiciones ideales y cambiar los parámetros hay diferencias que sugieren un peso explicativo de unas variables edáficas, más que algunas climáticas. Sin embargo, al intentar explicar las variables biológicas como la condición micorrizal, tiene validez a la hora de tener en cuenta su participación en la productividad de los Guadales junto con otras variables edáficas que la explican.

Se sugiere alimentar el modelo con resultados experimentales de otros municipios de Cundinamarca-Colombia y comparar este modelo conceptual con modelos estadísticos que otorguen robustez matemática al predecir las variables respuesta.

También, reducir el error del modelo ajustando mejor las relaciones causales y socializar el modelo utilizando una plataforma amena con los campesinos y productores de Guadua en la región.

## REFERENCIAS

- [1] C. Espinal y H. Martínez C, «La Cadena Productiva de la Guadua: Una mirada global de su Estructura y Dinámica,» Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural: Observatorio Agrocadenas Colombia, Bogotá D.C, Colombia, 2005.
- [2] X. Londoño, «Aspectos sobre la distribución y la ecología de los bambúes de Colombia (Poaceae: Bambusoideae),» vol. 77, n° 16, pp. 139-153, 1990.
- [3] J. Camargo, *Growth and productivity of the bamboo species Guadua angustifolia Kunth in the coffee region of Colombia*, Göttingen: Universidad de Göttingen, 2006.
- [4] X. Londoño, «El bambú en Colombia,» *Biotecnología Vegetal*, vol. 11, n° 3, pp. 143 - 154, Septiembre 2011.
- [5] . E. Judziewicz, L. Clark, X. Londoño y M. Stern, *American Bamboos*, Washington, USA: Smithsonian Institution Press, 1999.
- [6] L. A. Díaz, Á. García, W. Sandoval y B. E. Avendaño-Uribe, *!A producir guadua en Cundinamarca!*, Bogotá, D.C, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana, 2012.
- [7] F. López-Boita, *Estudio de la Micorriza Arbuscular en Guadua angustifolia Kunth establecida en diferentes altitudes, en suelos de la zona cafetera de Colombia*, Bogotá D.C: Pontificia Universidad Javeriana, 2010.
- [8] D. Suarez-Lizcano, *Relación de características edáficas con la micorriza arbuscular en renuevos de Guadua angustifolia en rodales naturales de tres municipios de Cundinamarca*, Bogotá D.C, Colombia: Universidad Francisco de Paula Santander-Cúcuta, 2011.
- [9] C. Herrera, *Dependencia micorrizal de guadua obtenida a partir de chisquines e inoculada con Glomus manihotis y Kuklospora colombiana*, Bogotá D.C, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana, 2010.
- [10] K. Fernandez, *Factores que afectan la ocurrencia de la micorrización y la concentración de micelio externo en guadales de tres municipios de Cundinamarca*, Bogotá, D.C.: Pontificia Universidad Javeriana, 2009.
- [11] F. López y L. Díaz, «Micorrización en Guadua angustifolia y Cynodon sp. En la zona cafetera de Colombia.,» de *VI Congreso Latinoamericano de Micología. Libro de Resúmenes.*, Buenos Aires, Argentina, Asociación Latinoamericana de Micología, 2008, p. 374 .
- [12] G. Martin, M. Duru, J. Schellberg y F. Ewert, «Simulations of plant productivity are affected by modelling approaches of farm management,» *Agricultural Systems*, n° 109, pp. 25-34, 2012.
- [13] X. Londoño, J. Muñoz y P. Rugeles, *Selección de materiales superiores de Guadua angustifolia Kunth en el Eje cafetero de Colombia*, Cali, Colombia: FERIVA S.A, 2011, p. 24 pág..
- [14] W. Grant y T. Swannack, *Ecological Modeling: A common-sense approach to Theory and Practice*, Malden, MA, USA.: Blackwell Publishing , 2008.
- [15] F. Castaño y R. Moreno, *Guadua para Todos, Cultivo y Aprovechamiento*, Bogotá. Colombia: Panamericana Formas e Imperesos S.A, 2004.
- [16] B. Bolker, «Deterministic Functions for Ecological Modeling,» de *Ecological Models and Data in R*, Princeton, USA., Princeton University Press, 2008.
- [17] D. Castillo-Brieva, *Modelamiento dinámico guía de trabajo*, Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana, 2007, p. 39 .

- [18] J. Serman, *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*, Massachusetts, USA: Irwin/McGraw-Hill, 2000, p. 282.
- [19] S. Jørgensen y G. Bendoricchio, *Fundamentals of Ecological Modelling*, Third Edition ed., Kidlington, Oxford. U.K: Elsevier, 2001.
- [20] M. e. a. Rengel, «Crecimiento y dinámica de acumulación de nutrientes en caña de azúcar. I. macronutrientes.» *Bioagro [online]*, vol. 23, n° 1, pp. 43-50, 2011.
- [21] H. Cruz-Ríos, *Bambú-Guadua "Guadua angustifolia Kunth" Bosques naturales en Colombia y Plantaciones comerciales en México*, Primera ed., H. C. R. COLMEX, Ed., Pereira, Colombia: AgroMod S.A-COLMEX, 2009, p. 698 págs.
- [22] C. Pérez, *Técnicas de Análisis Multivariante de Datos: Aplicaciones con SPSS*, Madrid, España: Pearson Education Prentice Hall, 2004, p. 672.
- [23] M. Crawley, *The R Book*, San Francisco, CA. USA: John Wiley & Sons Ltd., 2009, p. 877.
- [24] N. C. Brady y R. Weil, *Elements of the Nature and Properties of Soils*, Toronto, Canadá: Prentice-Hall, 2000.
- [25] M. Essington, *Soil and Water Chemistry: An integrative Approach*, New York, USA: CRC Press, 2004.
- [26] A. Antia, «Estudio de aptitud de los suelos para el cultivo de la guadua (*Guadua angustifolia* Kunth) en el departamento de Caldas.» *Revista de la Universidad de Caldas*, vol. 4, n° 1, pp. 61-70, ener-abr 1983.
- [27] V. Slankis, «Soil factors influencing formation on Mycorrhizae.» *Annu. Rev. Phytopathol*, n° 12, pp. 437-457, 1974.
- [28] C. Bronick y R. Lal, «Soil Structure and Magnament: A review.» *Geoderma*, n° 124, pp. 3-22, 2005.
- [29] P. Marschner, «Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants.» de *Rhizosphere Biology*, San Diego., Oxford Academic Press., 2012.
- [30] Z. Siddiqui y J. Pichtel, «Mycorrhizae: An Overview.» de *Mycorrhizae: Sustainable Agriculture and Forestry*, Muncie, USA., Springer Science, 2008, p. 1-35.
- [31] M. Habte, «Mycorrhizal fungi and plant nutrition.» de *lant Nutrient Management in Hawaii's Soils, Approaches for Tropical and Subtropical Agriculture*, Manoa, Hawaii, University of Hawaii, 2000, pp. 127-131.
- [32] S. Smith y D. Read, *Mycorrhizal Symbiosis*, Burlington, MA, USA: Academic Press of Elsevier., 2008.
- [33] S. Smith y A. Smith, «Roles of Arbuscular Mycorrhizal in plant nutrition and growth: New Paradigms from Cellular to Ecosystem Scales.» *Annu. Rev. Plant Biol.*, vol. 62, pp. 227-250, 2011.
- [34] B. Grümberg, C. Conforto, A. Rovea, M. Boxler, G. March, C. Luna, J. Meriles y S. Vargas Gil, *La glomalina y su relación con la productividad del Cultivo de Maíz*, Rosario, 2010.
- [35] S. Smith y D. Read, «Mycorrhizas in ecological interactions.» de *Mycorrhizal symbiosis*, San Diego, Elsevier, 2008, pp. 573-610.
- [36] M. Buendía, *Identificación de micorrizas asociadas con guadua (*Guadua angustifolia* Kunth) presente en tres climas del Quindío*, Ibagué-Tolima: Universidad del Tolima, 1990, p. 82.
- [37] G. Welbaum, A. Sturz, Z. Dong y J. Nowak, «Managing soil Microorganisms to improve productivity of Agro-Ecosystems. Critical Reviews in Plant Sciences. 23:2, 175-193.» *Critical Reviews in Plant Sciences*, vol. 23, n° 2, pp. 175-193, 2004.
- [38] A. Heinemeyer y A. Fitter, «Impact of temperature on the arbuscular mycorrhizal (AM) symbiosis: growth responses of the host plant and its AM fungal partner.» *Journal of Experimental Botany*, vol. 55, n° 396, pp. 525-534, 2004.
- [39] F. Castaño, *La silvicultura de la Guadua en Colombia*, Pereira: Servicio Nacional de Aprendizaje: SENA, 1992.
- [40] J. Camargo, J. Garcia y T. Morales, *Bases para la planificación y manejo silvicultural de Bosques de Guadua: Una aplicación a nivel de finca en la zona cafetera de Colombia*, Pereira, Risaralda. Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira-Colciencias, 2007.
- [41] J. Camargo, J. Rodriguez, J. Niño, O. Mosquera y A. Rios, *Desarrollo tecnológico para optimizar la calidad de los productos obtenidos de Guadua: Definiendo la madurez de los culmos y optimizando los procesos de organización*, Pereira, Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira-

- Colciencias, 2011.
- [42] J. García-Sierra y J. Camargo, *Definición de áreas óptimas de Calidad de Guadua (Guadua angustifolia Kunth), orientada a satisfacer las necesidades del Mercado*, Pereira, Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira, 2004.
- [43] S. R. Gliessman, *Agroecology: The ecology of sustainable Food Systems*, California, USA: CRC Press Taylor & Francis Group, 2007, pp. 299-353.
- [44] M. Rilling y D. Mummey, «Mycorrhizas and soil structure,» *New Phytologist*, n° 171, pp. 41-53, 2006.
- [45] D. Hui, J. Wang, X. Le, W. Shen y H. Ren, «Influences of biotic and abiotic factors on the relationship between tree productivity and biomass and China,» *Forest Ecology and Management*, n° 264, pp. 12-80, 2012.
- [46] M. Beth-Adams, «Ecological issues related to N deposition to natural ecosystems: research needs,» *Environment International*, n° 29, p. 189 – 199, 2003.
- [47] J. Zhao, Y. Dong, X. Xie, X. Li, X. Zhang y X. Shen, «Effect of annual variation in soil pH on available soil nutrients in pear orchards,» *Acta ecológica sinica*, n° 31, pp. 212-216, 2011.
- [48] J. H. García-Sierra, *Definición de áreas óptimas de Calidad de Guadua (Guadua angustifolia Kunth), orientada a satisfacer las necesidades del Mercado*, Pereira, Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira, 2004.
- [49] V. E. González y G. F. Ceballos, «Influencia de las condiciones edafoclimáticas sobre el DAP de la Guadua angustifolia Kunth en la Zona Cafetera,» *Revista de la Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas: Memorias del XLV Congreso Nacional de Ciencias Biológicas*, n° 22, pp. 36-37, 2010.
- [50] I. H. RORISON, «Mineral nutrition in time and space,» *New Phytologist*, n° 106, pp. 79-92, 2008.
- [51] F. Castaño-Nieto, *Estudio de la calidad de sitio y su incidencia en el crecimiento y desarrollo de las plantaciones de guadua (Análisis de caso: Valle del Cauca)*, Armenia, Quindío: Corporación Autónoma Regional del Quindío, 2002.
- [52] J. García-Sierra, J. Camargo, M. Dossman, L. Arias-Giraldo y G. Cardona, *Planning of Guadua forest based on Land Assesment and Soil Quality*, Tropentag: University of Kassel-Witzenhausen- University of Göttingen, 2007.
- [53] H. Chacón, *Modelo estadístico para el estudio de la dinámica de guaduales naturales sometidos a cuatro intensidades de entresaca en jurisdicción de la CVC*, Cali-Vallo: Convenio Universidad del Valle-CVC, 1987.
- [54] A. David-Galindo y D. Daza-Pérez, *Análisis exploratorio de un modelo estadístico para caracterizar la dinámica poblacional de guaduales naturales en la cuenca alta del rio cauca, área de jurisdicción de la CVC*, Cali-Vallo: Universidad del Valle, 1994.
- [55] M. Ronsheim, «The Effect of Mycorrhizae on Plant Growth and Reproduction Varies with Soil Phosphorus and Developmental Stage,» *Am. Midl. Nat.*, n° 167, pp. 28-39, 2012.
- [56] M. Sánchez de Prager y D. Velásquez, *El suelo, Las micorrizas: el micelio externo de los hongos formadores de micorriza arbuscular (HMA)*, Palmira: Universidad Nacional de Colombia, 2008.
- [57] J. B. Passioura, «Soil conditions and plant growth,» *Plant, Cell & Environment.*, vol. 2, n° 25, p. 311 – 318., 2002.
- [58] C. Herrera, *Dependencia Micorrizal en Guadua*, Bogotá D.C.: Pontificia Universidad Javeriana, 2010.

## AGRADECIMIENTOS

Gracias al programa de investigación: “Manejo Integrado del cultivo de la guadua, establecido bajo sistemas de producción limpia, en regiones con potencial productor del departamento de Cundinamarca” financiado por la Pontificia Universidad Javeriana y la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca en el marco de los programas de investigación sobre cadenas productivas del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. A todas aquellas personas que colaboraron con la toma de datos, sistematización y modelación del proceso para ser posible este proyecto.

## CURRÍCULUM

**Bryann Esteban Avendaño Uribe** es Biólogo y Ecólogo en formación de la Facultad de Estudios Ambientales y Rurales en la Pontificia Universidad Javeriana, con estudios continuados en Estadística Aplicada y Modelamiento ecológico y ambiental en la misma universidad. Sus áreas de interés incluyen la ecología de micorrizas, el modelamiento de ecosistemas tropicales con presencia de vegetación de alto valor económico o con regímenes de aprovechamiento por comunidades humanas bajo situación de pobreza en Colombia y la modelación de la dinámica de uso y aprovechamiento de los recursos naturales vegetales, bosques y agua.

**Daniel Castillo Brieva** es Candidato a Doctor en Geografía Humana, Económica y Regional, Universidad Paris Ouest Nanterre la Defense, Francia. MPhil. en Dinámica de Sistemas, Universidad de Bergen, Noruega. Especialista en Sistemas de Información Geográfica. Instituto Geográfico Agustín Codazzi-Universidad Distrital. Geólogo, Universidad Nacional de Colombia. Actualmente se desempeña como profesor-investigador del Departamento de Desarrollo Rural y Regional de la Facultad de Estudios Ambientales y Rurales de la Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá-Colombia. Sus áreas de interés y temáticas de investigación están enfocadas en la acción colectiva, análisis institucional y gobernabilidad en sistemas socioecológicos, el Modelamiento dinámico, y de acompañamiento (ComMod), para el estudio y la intervención en sistemas socio-ecológicos.

**Lucía Ana Díaz Ariza** es Master en Desarrollo Rural y Regional de la Facultad de Estudios Ambientales y Rurales en la Pontificia Universidad Javeriana, MSc. en Biología con énfasis en Biología vegetal de la Facultad de Ciencias en la misma Universidad, título de pregrado en Microbiología por la Universidad de los Andes, Bogotá-Colombia. Sus áreas de interés son la biotecnología y estudio biológico de las asociaciones suelo-planta-microorganismo, actualmente lidera un laboratorio adscrito a la Unidad de Biotecnología Vegetal de la Pontificia Universidad Javeriana incursionando en los bioproductos derivados de las asociaciones de Bamboos y otras gramíneas con hongos de micorriza y bacterias promotoras del crecimiento vegetal, con potencial para generar innovación en el sector agrobiotecnológico y alimenticio en Colombia.



[www.dinamica-de-sistemas.com](http://www.dinamica-de-sistemas.com)

## Libros

## Cursos Online



[Ejercicios](#)



[Curso Básico Intensivo en Dinámica de Sistemas](#)



[Avanzado](#)



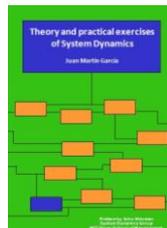
[Curso Superior en creación de modelos de simulación](#)



[Conceptos](#)



[Modelos de simulación en ecología y medioambiente](#)



[English](#)



[Planificación de empresas con modelos de simulación](#)



[Português](#)



[System Thinking aplicado al Project Management](#)