



APLICACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DEL SUELO
COMO INDICADORAS DE LA EFECTIVIDAD DE LAS ESTRATEGIAS DE
RESTAURACIÓN IMPLEMENTADAS EN EL CORREDOR BARBAS – BREMEN
(QUINDÍO – COLOMBIA)

MARCELA DELGADO ESGUERRA

Proyecto de grado

William Vargas

Director Programa de Biología

UNIVERSIDAD ICESI
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
CALI
2012

TABLA DE CONTENIDO

	pag.
RESUMEN	7
1. INTRODUCCIÓN.....	9
2. PROBLEMA A TRATAR	10
2.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	10
2.2 FORMULACIÓN Y ANÁLISIS DEL PROBLEMA	10
2.3 JUSTIFICACIÓN	10
2.4 DELIMITACIÓN.....	11
3. MARCO DE REFERENCIA.....	12
3.1 ANTECEDENTES	12
3.2 MARCO TEÓRICO.....	13
3.2.1 RESTAURACIÓN ECOLÓGICA	13
3.2.2 SUCESIÓN, ACELERACIÓN DE LA SUCESIÓN Y ESPECIES PIONERAS INTERMEDIAS.....	14
3.2.3 CORREDORES BIOLÓGICOS.....	16
3.2.4 IMPORTANCIA DEL ESTUDIO DE LOS SUELOS	17
3.2.5 PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO.....	18
3.2.6 FERTILIDAD DEL SUELO: LA IMPORTANCIA DE LOS MACRO Y MICRONUTRIENTES PARA LAS PLANTAS	19
3.2.7 MÉTODOS DE MUESTREO DE SUELO.....	20
3.2.8 EL SUELO Y LOS PROCESOS DE SUCESIÓN	20
3.2.9 APORTE CRÍTICO	21
4. OBJETIVOS	22
4.1 OBJETIVO GENERAL	22
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
5. METODOLOGÍA	23
5.1 ÁREA DE ESTUDIO.....	23
5.2 MÉTODOS DE MUESTREO	24
5.3 PROCESAMIENTO DE LAS MUESTRAS.....	25
5.4 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN.....	25
5.5 RESULTADOS ESPERADOS.....	26
6. RESULTADOS	27

7. DISCUSIÓN.....	34
7.1 TEXTURA	34
7.2 pH	35
7.3 FERTILIDAD	36
7.3.1 CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO (CIC)	36
7.3.2 TIPO DE SUELO	37
7.3.3 MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO	38
8. CONCLUSIONES	44
9. RECOMENDACIONES.....	45
10. BIBLIOGRAFÍA.....	46
ANEXOS	52

ÍNDICE DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1. Características fisicoquímicas del suelo para los tres elementos del paisaje en el muestreo realizado en agosto 2012	27
Tabla 2. Características fisicoquímicas del suelo para los tres elementos del paisaje en el muestreo realizado en septiembre 2005.....	28
Tabla 3. Cálculo del porcentaje de nitrógeno, porcentaje de carbono, porcentaje de saturación de bases y relación Ca/Mg para los datos correspondientes al muestreo de 2012.....	29
Tabla 4. Cálculo del porcentaje de nitrógeno, porcentaje de carbono y relación Ca/Mg para los datos correspondientes al muestreo de 2005.....	29
Tabla 5. Equivalencias en el diagrama de clúster.....	31
Tabla 6. Clústers formados a una distancia de aproximadamente 1.2.....	32

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1. Área de estudio	23
Figura 2. Puntos de muestreo en los tres elementos del paisaje.....	24
Figura 3. Procedimiento de muestreo en el Corredor los Monos.....	25
Figura 4. Porcentaje de materia orgánica correspondiente al muestreo realizado en el año 2012.....	30
Figura 5. Porcentaje de materia orgánica correspondiente al muestreo realizado en el año 2005.....	30
Figura 6. Clúster elaborado con las variables porcentaje de materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico para los datos de 2012.....	31
Figura 7. Relación entre pH y materia orgánica (%) para los datos de 2012.....	32
Figura 8. Relación entre la capacidad de intercambio catiónico (cmol/kg) y la materia orgánica (%) para los datos de 2012.....	33
Figura 9. Porcentaje de nitrógeno y carbono para los datos de 2012.....	33

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pag.
Anexo 1. Presupuesto del proyecto.....	52
Anexo 2. Cronograma.....	53
Anexo 3. Matriz de marco lógico.....	54
Anexo 4. Elementos esenciales obtenidos del suelo.....	55
Anexo 5. Puntos de muestreo.....	56
Anexo 6. Métodos utilizados en el laboratorio del CIAT para determinar las características fisicoquímicas de las muestras de suelo.....	57
Anexo 7. Clasificación de pH.....	57
Anexo 8. Niveles de materia orgánica (%).....	58
Anexo 9. Niveles de micronutrientes y fósforo (mg/kg).....	58
Anexo 10. Niveles de macroelementos (cmol/kg).....	58
Anexo 11. Niveles de capacidad de intercambio catiónico (cmol/kg).....	58
Anexo 12. Proporciones óptimas de la CIC para los cationes.....	59
Anexo 13. Relación Ca/Mg.....	59
Anexo 14. Clasificación de los suelos en Filandia (Quindío).....	59
Anexo 15: Efectos del pH en la disponibilidad de nutrientes y actividad de microorganismos.....	60

RESUMEN

La restauración de ecosistemas que han sido degradados, dañados o transformados busca retornar al ecosistema a su trayectoria histórica, de manera que logre recuperar su composición, estructura y dinámicas. En 2001 se inició un proyecto de restauración basado en la aceleración de la sucesión en Filandia (Quindío), el cual buscaba restablecer la conectividad funcional entre la reserva forestal Bremen y el cañón del río Barbas que habían quedado aislados a causa de la fragmentación por acciones antrópicas. Inicialmente se realizó la caracterización del paisaje mediante los grupos biológicos de plantas, aves y hormigas, determinándose especies amenazadas y endémicas; posteriormente se establecieron cuatro corredores biológicos que conectaban las dos áreas utilizando diferentes estrategias de restauración como el rescate de plántulas, rescate de plántones y utilización de especies con alta capacidad de rebrote, apoyadas por un vivero, que era un elemento clave para lograr la aceleración de los procesos sucesionales. Desde su establecimiento, los corredores han sido evaluados teniendo en cuenta indicadores biológicos como los mamíferos, las aves y las plantas, pero no se han realizado estudios utilizando indicadores abióticos. Este trabajo tiene como objetivo estimar la efectividad de las estrategias de restauración ecológica, utilizando como indicador las características fisicoquímicas del suelo. Para lograr este objetivo se analizaron las características fisicoquímicas en tres elementos del paisaje, se realizó la comparación entre ellos y asimismo se compararon los resultados obtenidos con un análisis de suelo realizado en 2005. En el análisis de suelo no se observaron diferencias en cuanto a la concentración de elementos menores y mayores en los tres elementos del paisaje, debido posiblemente a que las muestras provenían del mismo material parental, sin embargo se observaron cambios en los niveles de materia orgánica, presentándose niveles altos en los bosques, medio-altos en los corredores y bajos, medios y altos en los potreros; teniendo en cuenta esta variable y la capacidad de intercambio catiónico se elaboró un clúster para determinar similitud entre los sitios muestreados y se encontraron conglomerados formados por bosque y corredor y otros formados por potreros, lo cual es un primer indicio de una restauración positiva. Adicionalmente, se encontró una correlación entre el pH y la materia orgánica y entre la materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico, lo cual es acorde a lo expresado en la literatura. Estos resultados permiten explicar en parte la efectividad de las estrategias de restauración, la cual ha sido ya mostrada utilizando varios grupos biológicos. Se recomienda realizar estudios que permitan determinar con mayor certeza el éxito de las estrategias sobre la recuperación de las dinámicas del suelo, entre ellos la utilización de microorganismos como indicadores, los cuales se encuentran estrechamente asociados con el contenido de materia orgánica en el suelo.

Palabras clave: Restauración, sucesión, corredor biológico, fisicoquímica del suelo

ABSTRACT

The restoration of ecosystems that have been degraded, damaged or transformed seeks to return the ecosystem to its historic trajectory, so it can recover its composition, structure and dynamics. In 2001, a restoration project based on the acceleration of succession was initiated in Filandia (Quindío), which sought to restore the functional connectivity between Bremen forest reserve and Barbas river canyon that had been isolated due to the fragmentation of anthropogenic actions. Initially, landscape characterization was performed by biological groups of plants, birds and ants, threatened and endemic species were determined, later four corridors that connected the two areas were established using different restoration strategies as the rescue of seedlings, saplings and rescue use of species with high regrowth capacity, supported by a vivarium, which was a key element in achieving accelerated successional processes. Since its establishment, the corridors have been evaluated considering biological indicators such as mammals, birds and plants, but no studies have been conducted using abiotic indicators. This study aims to estimate the effectiveness of ecological restoration strategies, using the physicochemical characteristics of the soil as an indicator. To achieve this goal the physicochemical characteristics of three landscape elements were analyzed, the comparison was made between them and also were compared the results obtained with a soil test conducted in 2005. The soil analysis showed no differences in the concentration of major and minor elements in the three elements of the landscape, possibly because the samples came from the same parental material, however changes were observed in the levels of organic matter, presenting high levels in the forest, medium-high in the corridors and low, medium and high in pastures; taking this variable into account and the cation exchange capacity a cluster was elaborated to determine similarity between the sampling sites and were found clusters formed by corridors and forest and by pastures, which is a first indication of a positive restoration. In addition, a correlation was found between pH and organic matter and among the organic matter and the cationic exchange capacity, in agreement with previous works. These results partially explain the effectiveness of restoration strategies, which has already been shown using various biological groups. Additional studies are recommended to determine, with greater certainty, the success of recovery strategies on soil dynamics, including the use of microorganisms as indicators, which are closely associated with the content of organic matter in the soil.

Keywords: Restoration, Succession, biological corridor, physicochemical of soil

1. INTRODUCCIÓN

El establecimiento de corredores biológicos como mecanismo de restauración ecológica ha sido ampliamente utilizado alrededor del mundo (Bennett & Mulongoy, 2006). En Colombia el corredor Barbas-Bremen en Filandia (Quindío) es considerada una estrategia pionera en restauración de paisajes rurales, cuyo objetivo principal era restablecer la conectividad entre dos fragmentos de bosque que habían quedado aislados por la ampliación de la frontera agrícola y ganadera (Lozano, et al., 2006).

El ecosistema que ha sido restaurado exhibe procesos de sucesión natural, observándose cambios en la composición de especies a lo largo del tiempo (Krebs, 2009); estos cambios en la comunidad de plantas, animales o microorganismos son utilizados frecuentemente como indicadores biológicos para evaluar la efectividad de la restauración; en los últimos años el potencial de conectividad del corredor Barbas-Bremen fue evaluado utilizando mamíferos pequeños y medianos como indicadores (Bedoya, 2007).

Este trabajo de grado busca utilizar las características fisicoquímicas del suelo como indicadoras de la efectividad de las estrategias de restauración implementadas en el corredor Barbas-Bremen. Los objetivos del trabajo fueron: determinar las características fisicoquímicas del suelo en los diferentes puntos de muestreo, asociar los resultados con el desarrollo actual de los corredores, realizar la comparación entre los diferentes puntos de muestreo y comparar estos resultados con un análisis de suelo realizado en 2005.

Para el muestreo de suelo se determinaron tres elementos del paisaje a evaluar: bosque maduro, zona restaurada (corredor) y potrero aledaño a los corredores, se establecieron puntos de muestreo a cada lado de la carretera que atraviesa los corredores para un total de 14 puntos (6 en corredores, 6 en potreros y 2 en bosque maduro). Con esta información se realizó el muestreo de suelo, tomando tres submuestras de cada punto de muestreo para su posterior mezclado y empacado siguiendo todos los protocolos requeridos para evitar su contaminación y obtener resultados precisos del laboratorio de análisis de suelos.

La importancia del trabajo radica en resaltar la necesidad de realizar un análisis de suelo antes de iniciar un proyecto de restauración, que permita visualizar diferencias en las características fisicoquímicas entre la zona que se quiere restaurar y el ecosistema de referencia y así poder tomar las medidas necesarias para lograr éxito en la restauración. Asimismo, es importante este análisis preliminar para efectuar estudios comparativos posteriores, que permitan evaluar el avance de la restauración y saber cuanto hace falta para lograr el objetivo deseado.

2. PROBLEMA A TRATAR

2.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Siete años después del establecimiento del corredor Barbas-Bremen, se busca utilizar las características fisicoquímicas del suelo en diferentes elementos del paisaje como indicadores de la efectividad de las estrategias de restauración implementadas.

2.2 FORMULACIÓN Y ANÁLISIS DEL PROBLEMA

Dentro de las mayores amenazas que enfrenta la biodiversidad se encuentran la pérdida, degradación y fragmentación del hábitat, ocasionadas principalmente por factores antropogénicos (Primack, 2010). En 2001 se inició el establecimiento de corredores biológicos en Filandia (Quindío) como estrategia para el restablecimiento de la conectividad en paisajes fragmentados entre el cañón del río Barbas y la reserva forestal de Bremen, abarcando un área aproximada de 67 hectáreas (Vargas W. G., 2008). Para la caracterización inicial del paisaje se utilizaron tres grupos biológicos objetivo (hormigas, plantas y aves) y se determinó su diversidad, composición y riqueza, así como la presencia de especies endémicas y amenazadas (Lozano F. H., 2009). El objetivo del corredor era permitir la conexión y movimiento de poblaciones que habían quedado aisladas en parches, debido a la fragmentación, trayendo como beneficio el incremento de la variabilidad genética y la posibilidad para las especies de encontrar sitios más adecuados de hábitat. Este proyecto busca establecer la funcionalidad de los corredores utilizando como indicador el cambio en las características físicas y químicas del suelo.

Diversas estrategias de restauración fueron empleadas en el establecimiento del corredor, las cuales han sido objeto de evaluación durante los últimos siete años. Las estrategias implementadas pueden estar generando condiciones favorables para que especies de fauna puedan establecerse o usar las áreas restauradas, asimismo, la disponibilidad de recursos y de hábitat pueden estar favoreciendo la presencia de grupos claves de plantas y animales.

2.3 JUSTIFICACIÓN

El estudio y análisis de suelos como indicadores de efectividad de la restauración ecológica es un área emergente de gran importancia, debido a que permite conocer la dinámica de los suelos en la sucesión y así diseñar e implementar estrategias de restauración que favorezcan cambios en la dinámica de los nutrientes y de la materia orgánica. El impacto de estas estrategias se debe

evidenciar en una mayor diversidad microbiológica con efectos importantes sobre el establecimiento de especies de plantas de estados sucesionales intermedios y tardíos, claves en la aceleración de los procesos sucesionales. Estas especies pioneras intermedias utilizadas en la sucesión acelerada, generan grandes cantidades de biomasa y las condiciones ambientales adecuadas para el establecimiento de micro y macroorganismos, que a su vez generan cambios a nivel del suelo. La importancia del proyecto radica en la necesidad de implementar indicadores abióticos como las características fisicoquímicas del suelo, que al complementarse con los indicadores utilizados generalmente, como la diversidad de plantas o animales, permitan determinar con mayor exactitud la trayectoria positiva o negativa que presenta la restauración.

2.4 DELIMITACIÓN

El proyecto “Aplicación de las características fisicoquímicas del suelo como indicadores de la efectividad de las estrategias de restauración implementadas en el corredor Barbas – Bremen (Quindío – Colombia)” busca determinar la efectividad de las estrategias de restauración empleadas en la implementación del corredor Barbas-Bremen en Filandia (Quindío), proceso que se inició en 2001. Durante la ejecución del proyecto se analizarán las características físicas y químicas del suelo en tres puntos claves de los corredores, que corresponden a la zona restaurada, el potrero que limita con el corredor y el bosque maduro con el fin de comparar los resultados entre estos tres puntos y también analizar la variación en la composición con una caracterización realizada en 2005.

3. MARCO DE REFERENCIA

3.1 ANTECEDENTES

En los últimos años, los corredores biológicos han sido introducidos en los programas de conservación de la biodiversidad en diferentes países de Europa del Este, Norteamérica, Suramérica, Australia y Asia, donde han cumplido con su propósito principal de conectar paisajes fragmentados y permitir la dispersión de las poblaciones, el intercambio genético entre éstas y la migración. Dentro de las iniciativas se encuentra la red ecológica nacional en los Países Bajos, que abarca un área total de 730.000 ha, sus objetivos incluyen la instauración de áreas núcleo y el desarrollo de zonas naturales y corredores; este último objetivo busca restaurar la conexión entre la zona boscosa de Veluwe con la parte sur del río Rin y así incrementar el hábitat disponible para especies de mamíferos como el jabalí y los ciervos, reptiles y anfibios; aunque el programa de conservación está proyectado hasta el 2018 ha tenido grandes avances como la demolición de un complejo industrial y la restauración del suelo (Bennett & Mulongoy, 2006).

En cuanto a los programas desarrollados en Norte América se encuentra el corredor Cascade, ubicado en las Montañas Rocosas de Canadá y cuya instauración se produjo por la necesidad de conservar las poblaciones de lobos, esta conexión incrementó su efectividad al disminuir la presencia humana en la zona y ha tenido los efectos esperados de incrementar el rango de hábitat de esta especie (Bennett & Mulongoy, 2006).

En Suramérica existen alrededor de 82 iniciativas de redes ecológicas y corredores, donde se destaca Colombia con 17 de estos programas, entre éstos se encuentra el corredor Barbas-Bremen en Filandia (Quindío) (Bennett & Mulongoy, 2006). Esta iniciativa se creó por la necesidad de unir parches de hábitat fragmentados como resultado de la actividad humana (desarrollo urbano, incremento de áreas de cultivo y pastizales para ganado), algunos de estos parches presentan zonas de bosque con una gran diversidad de especies, incluidas especies endémicas, lo que conduce a que su conservación sea considerada una prioridad (Lozano, et al., 2006).

El corredor Barbas-Bremen es considerado una estrategia pionera a nivel nacional en términos de conservación en paisajes rurales. Dado que la mayoría de iniciativas se han presentado para zonas con una baja intervención, en este caso se tomaron los grupos biológicos de plantas, aves e insectos para realizar la caracterización biológica del paisaje, determinándose su diversidad y presencia de especies amenazadas y endémicas (Lozano, et al., 2006). En la caracterización de la cuenca media del río Barbas se encontraron 399 especies de plantas, 169 de aves y 95 de hormigas, de las cuales 18 especies de plantas y 4 de aves están

amenazadas, además se determinó que 37 especies de aves son sensibles a la fragmentación del bosque, encontrándose únicamente en los bosques grandes de Bremen y Barbas, 20 de estas sólo se localizaron en el cañón del Río Barbas y 16 en la Reserva Forestal de Bremen, haciéndose evidente la necesidad de conectar el paisaje (Lozano, et al., 2006).

Como estrategia para la generación de conectividad estructural, hábitat y conservación de la biodiversidad se establecieron cuatro corredores con un área aproximada de 68 ha, beneficiándose un área total de bosque de 1600 ha (Lozano, et al., 2006). Con el fin de evaluar el potencial de conectividad de estos corredores, se realizó un estudio en el 2007 con mamíferos terrestres medianos y grandes basado en su abundancia y distribución, encontrándose 19 especies; aunque la abundancia relativa encontrada no fue homogénea para todas las especies en los lugares muestreados, esto no indica que los corredores no estuvieran funcionando, dado que este estudio no tenía punto de comparación, es decir, en la caracterización inicial del paisaje no se tomó en cuenta el grupo de los mamíferos y además los corredores llevaban poco tiempo de haberse establecido, con todas estas variables, se pudo determinar una conectividad funcional para 5 especies con requerimientos de hábitat no muy específicos (Bedoya, 2007), lo cual da un primer indicio de la efectividad de los corredores como mecanismo de restauración ecológica.

Actualmente se realizan estudios para evaluar la efectividad de los corredores y de las estrategias de restauración con insectos, aves, plantas y otros grupos. Sin embargo, no se registran estudios acerca de la efectividad de las estrategias de restauración utilizando como referencia los cambios en las características fisicoquímicas de los suelos, siendo esta una oportunidad para evaluar los corredores de forma relativamente rápida utilizando otros mecanismos que no incluyen grupos biológicos ampliamente estudiados en la zona como los mamíferos y las aves.

3.2 MARCO TEÓRICO

3.2.1 RESTAURACIÓN ECOLÓGICA

La fragmentación o destrucción del hábitat puede producirse tanto por causas naturales como antropogénicas, en cualquiera de los dos casos se pueden iniciar procesos de restauración ecológica, que buscan restablecer el ecosistema degradado cuando éste no puede por sí mismo retornar a su estado original, ya sea por que el daño es muy intenso o se requerirían siglos para lograrlo de forma natural (Primack, 2010).

La restauración toma como base un ecosistema de referencia, que sirve como modelo para establecer el proyecto y además para realizar su evaluación posterior, este ecosistema modelo no debe tomarse como estático, debido a que los ecosistemas experimentan cambios con el tiempo a causa de factores como el cambio climático, la sucesión vegetal y las variaciones en la composición de especies, entre otros. En una visión más realista, la restauración no buscaría retornar el ecosistema a un estado histórico, sino intentar recuperar un rango natural de la estructura, composición y dinámica ecosistémica (Falk, Palmer, & Zedler, 2006).

Con el fin de determinar el éxito de la restauración se evalúan ciertos atributos como la similitud entre el número de especies presentes en el ecosistema restaurado y el de referencia, la presencia de grupos biológicos funcionales como los dispersores de semillas, la capacidad del ecosistema restaurado para sostener poblaciones reproductivas, la posibilidad de intercambio biótico o abiótico con el paisaje general, la capacidad del ecosistema de soportar perturbaciones y su autosostenibilidad (Society for Ecological Restoration (SER) International, Grupo de Trabajo sobre Ciencia y Políticas, 2004; Primack, 2010).

En algunos casos, la restauración requiere solamente la identificación del agente perturbador y su posterior remoción, de manera que las comunidades originales puedan restablecerse mediante procesos de sucesión natural a partir de poblaciones remanentes, pero en la mayoría de los casos cuando el ecosistema ha experimentado múltiples perturbaciones, se demandan más esfuerzos y el reto es mayor, dado que se puede requerir la modificación del ambiente físico, adicionando suelo y nutrientes, la remoción de especies invasoras y la reintroducción de especies nativas de forma que puedan iniciarse los procesos de sucesión natural (Falk, Palmer, & Zedler, 2006; Primack, 2010).

La implementación de corredores es un mecanismo de restauración ecológica, que busca mediante la conexión de parches fragmentados retornar la integridad del paisaje, permitiendo la dispersión de especies y el establecimiento de éstas en hábitat más apropiados (Hilty, Lidicker, & Merendeler, 2006).

3.2.2 SUCESIÓN, ACELERACIÓN DE LA SUCESIÓN Y ESPECIES PIONERAS INTERMEDIAS

El ecosistema restaurado exhibe cambios progresivos en la composición de especies de la comunidad a lo largo del tiempo (Krebs, 2009), fenómeno denominado sucesión. Este proceso también puede referirse a la secuencia de plantas, animales y comunidades microbianas que sucesivamente ocupan un área determinada en un periodo de tiempo o hace referencia al proceso de cambio en el que las comunidades bióticas son reemplazadas unas a otras y el ambiente físico es alterado en un periodo de tiempo (Kimmins, 1987). Las sucesiones

pueden clasificarse en primarias o secundarias, de acuerdo a la intensidad de las perturbaciones que presenta el ecosistema; la primaria ocurre en un área que ha quedado completamente estéril, es decir, sin remanentes biológicos, debido a eventos como erupciones volcánicas, deshielo de un glacial, entre otros, donde queda expuesto el sustrato y no hay suelo desarrollado, por otra parte, la sucesión secundaria ocurre en un ambiente en el que aún permanece un legado biológico como semillas, raíces y en ocasiones algunas plantas vivas, este tipo de sucesión es el que más se observa y debido a la menor intensidad de las perturbaciones que la originan, el suelo mantiene muchas propiedades que son necesarias para el resurgimiento de la vegetación, esta sucesión puede observarse después de la tala de un bosque, formación de claros por caídas de árboles, incendios superficiales, abandono de tierras de cultivo, entre otros (Valverde Valdés, Meave del Castillo, Carabias Lillo, & Cano Santana, 2005; Krebs, 2009).

Existen diversas teorías de sucesión desde comienzos del siglo XX (Krebs, 2009). La teoría florística de relevo o teoría clásica de sucesión, postulada por Egler, muestra un sistema de orden jerárquico en el cambio de la comunidad, es decir, se observa un reemplazo de una comunidad vegetal por otra a través del tiempo. Este autor también postuló otro modelo denominado composición florística inicial, en la que se asume que las especies características de la comunidad se encuentran desde el comienzo del proceso sucesional en forma de semillas, propágulos, etc., y cada una de estas especies cuenta con diferentes tasas de establecimiento, crecimiento, desarrollo y supervivencia, es decir, la sucesión se presenta como un cambio en la dominancia relativa de diferentes especies y no en su presencia o ausencia en la comunidad (Martínez Romero, 1996; Krebs, 2009).

Entre las contribuciones más importantes al entendimiento de la sucesión, y al papel de ésta dentro de la restauración ecológica se encuentran las propuestas de Connell y Slatyer (1979), quienes enmarcan la sucesión dentro de los modelos de facilitación, inhibición y tolerancia. En el primer modelo las especies pioneras colonizan en los estados tempranos de sucesión, mejorando el microambiente y facilitando la llegada y establecimiento de especies de estados sucesionales medios o tardíos; en el modelo de inhibición las especies pioneras impiden el establecimiento de otras especies, alterando el microambiente para su propio beneficio y en detrimento de las demás especies, finalmente, el modelo de tolerancia, implica que tanto especies pioneras como de estados sucesionales tardíos pueden encontrarse al comienzo de la sucesión, es decir, la presencia de especies pioneras no es esencial y depende de la tolerancia de las especies a los recursos limitantes su posibilidad de permanecer o ser reemplazadas por otras (Krebs, 2009; Greipsson, 2011). Estos modelos no son excluyentes, y pueden encontrarse operando de manera conjunta en los ambientes naturales.

Los ecosistemas forestales obtienen la mayor parte de los nutrientes de la descomposición de la hojarasca y de la materia orgánica; la hojarasca es considerada la vía de entrada principal de los nutrientes en el suelo y funciona

como un punto clave del reciclaje de la materia orgánica y los nutrientes; por su parte, la materia orgánica del suelo tiene una gran capacidad almacenadora de agua, su capacidad de intercambio catiónico es elevada, incrementando la retención de nutrientes disponibles para las plantas y evitando su lixiviación, promueve la actividad de los microorganismos, sirve como reservorio de carbono terrestre, entre otras funciones (O'Neill, Amacher, & Perry, 2005; Sanchez, Crespo, Hernandez, & García, 2008).

La materia orgánica al provenir principalmente de tejidos vegetales contiene los elementos esenciales para las plantas y para el desarrollo de la macro y microfauna y su cantidad se ve afectada por los inputs que recibe el ecosistema de estos residuos tanto vegetales como animales; su ciclo depende de las tasas de descomposición y acumulación, que están determinadas por las propiedades fisicoquímicas y biológicas del suelo, las cuales a su vez, la materia orgánica puede llegar a modificar (Bot & Benites, 2005). En este ciclo, la acumulación de materia orgánica depende principalmente de la hojarasca y otros residuos vegetales y su descomposición de la actividad biológica del suelo, estos organismos generan cambios en las condiciones del suelo, que favorecen el establecimiento de ciertas especies de plantas que al producir hojarasca y otros residuos vegetales pueden cambiar la composición de la materia orgánica y en consecuencia producir cambios en la comunidad microbiana, repitiéndose el ciclo una y otra vez.

La restauración basada en aceleración de sucesión, mediante el uso de pioneras intermedias de alta producción de hojarasca y biomasa busca generar altos niveles de materia orgánica que promuevan mejores condiciones del suelo para la germinación y establecimiento de plantas, así como de microorganismos asociados a procesos y ciclos de nutrientes.

3.2.3 CORREDORES BIOLÓGICOS

Los corredores biológicos conectan hábitats y actúan como avenidas sobre las cuales pueden dispersarse las especies animales, propagarse las especies vegetales, producirse intercambio genético y se promueve el movimiento de las poblaciones en respuesta a presiones ambientales, además, permite que especies amenazadas puedan encontrar hábitat más apropiados para su supervivencia (Walker & Craighead, 1997). La conectividad se refiere a la habilidad de los organismos de moverse entre parches de hábitat adecuados y es variable dependiendo de la especie y su destreza para desplazarse así como la motivación que tenga para abandonar su hábitat original (Hilty, Lidicker, & Merendeler, 2006), de esta forma, el corredor puede verse como la estructura que permite la conectividad.

Existen dos formas en que los corredores facilitan la colonización de parches, una de ellas es la expresada por la hipótesis tradicional del corredor, según la cual, los corredores funcionan como conductos de movimiento y la hipótesis de “Drift Fence”, en la que los corredores sirven como medio de interceptación de los individuos que se encuentran dispersándose en el paisaje circundante y los dirigen hacia los parches conectados por los corredores (Haddad & Baum, 1999).

En el establecimiento del corredor Barbas-Bremen se utilizó una estrategia basada en la aceleración de la sucesión a partir de diferentes métodos como el rescate de plántulas y plántones (0.8 – 7m de altura), el empleo de estacones con elevada capacidad de rebrote para reemplazar cercas muertas por cercas vivas, el uso de especies pioneras intermedias como mecanismo para dinamizar y acelerar la sucesión, el uso de especies productoras de recursos para la fauna, el uso de especies amenazadas y endémicas y el empleo de plantas pioneras y exóticas de crecimiento rápido para controlar pasturas. Con esta sucesión acelerada se buscaba ampliar el hábitat para las especies, incrementar los recursos para la fauna, rescatar especies amenazadas y establecer la conectividad entre los dos fragmentos de bosque en un tiempo reducido (Vargas W. G., 2008).

3.2.4 IMPORTANCIA DEL ESTUDIO DE LOS SUELOS

El suelo se define como la capa superior de la tierra donde se desarrollan las raíces de las plantas y de donde toman los nutrientes necesarios para su desarrollo; cumple funciones vitales como el sostenimiento vertical de las plantas para acceder a la luz solar, almacenamiento de agua en cantidades requeridas por las plantas, oferta de elementos químicos requeridos por los organismos vivientes, constituye un reservorio de carbono, entre otros (Buol, 2008; Dash & Dash, 2009; Hernandez, Hoyos, & Hoyos, 2011).

Los estudios de suelo se realizan con diversos objetivos como conocer la capacidad de uso y manejo óptimo de las tierras, evaluar la respuesta de las tierras al ser regadas o drenadas con diferentes sistemas y establecer políticas de manejo para el uso sostenible de las tierras y su desarrollo ya sea agrícola, forestal, ambiental, etc. (Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), 2010). Al conocer la capacidad de uso y manejo de las tierras es posible establecer su potencial productivo en bienes y servicios, que determinará su utilización para fines agrícolas, pecuarios o ambientales en caso de establecerse o restaurarse bosques, que ayudarán a regular el ambiente y conservar la biodiversidad (Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), 2010).

El estudio de los suelos como ciencia es un área emergente que últimamente ha tenido una mayor influencia a nivel mundial, pero que aún está en desarrollo, por ejemplo, estudios realizados en bosques secundarios del noreste de China señalan la poca información disponible acerca de los cambios presentados en los

suelos y también la poca investigación realizada en la dinámica de la biomasa microbiana y los nutrientes en el suelo en las diferentes edades de plantación del bosque secundario (Jia, Cao, Wang, & Wang, 2005). La mayoría de los estudios sobre sucesión secundaria tienden a enfocarse en las especies o grupo de especies que dominan los diferentes estados de la sucesión, mientras que características funcionales como cambios en los ciclos de nutrientes o en las propiedades de los suelos son dejadas en un segundo plano (Guariguata & Ostertag, 2000).

El análisis de suelos es importante también para diagnosticar desordenes nutricionales de las plantas, los cuales están relacionados con desbalances de nutrientes en el suelo. Este análisis incluye la caracterización química y física; con la primera se puede llegar a determinar la capacidad que tiene el suelo para proporcionar los nutrientes necesarios para el desarrollo de las plantas, así como la presencia de elementos que pueden ser tóxicos; por su parte, la caracterización física busca determinar la capacidad de almacenamiento del agua en los suelos, el grado de compactación, entre otros (Cuesta, et al., 2005; Hernandez, Hoyos, & Hoyos, 2011).

La salud del suelo puede definirse como la capacidad que tiene este para funcionar como un sistema viviente que logre sostener la productividad biológica, promover la calidad ambiental y mantener la salud vegetal y animal (Doran & Zeiss, 2000). El suelo puede ser visto como un indicador de la salud del bosque, debido a que su productividad se ve seriamente afectada por los cambios en sus propiedades fisicoquímicas y biológicas producidos después de una perturbación; la cantidad de materia orgánica es considerada un indicador clave para determinar la calidad del suelo por sus atributos en la regulación de estas propiedades y su dirección o cambio de los niveles con el tiempo a partir de análisis visuales o químicos ha sido utilizado como indicador para el rendimiento de cultivos y para la salud ambiental y del suelo (Doran & Zeiss, 2000; O'Neill, Amacher, & Perry, 2005).

3.2.5 PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO

Dentro de las propiedades físicas del suelo se encuentran el color, la textura, porosidad, permeabilidad y drenaje; estas propiedades pueden determinarse inicialmente al realizar el muestreo de los suelos al tener contacto directo con la muestra. Como ejemplos de esto, al observar un color oscuro posiblemente sea signo de riqueza de materia orgánica, en cuanto a la textura, ésta depende de las partículas que componen el suelo, las cuales se clasifican de acuerdo a su tamaño de menor a mayor en arcillas, limos y arenas, cuando el suelo tiene una composición similar de las tres partículas se siente suave al manipularlo y en términos de facilidad para cultivar y riqueza en nutrientes para las plantas son considerados los mejores (Hernandez, Hoyos, & Hoyos, 2011).

La permeabilidad del suelo se refiere a la facilidad con que se da el movimiento del agua y el aire dentro del suelo y en el caso en que éste tienda a encharcarse se dice que su permeabilidad es baja y finalmente el drenaje mide la rapidez con que los suelos se secan luego de haber sido inundados por eventos como la lluvia (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Putumayo (Colombia) Programa Nacional de Transferencia de Tecnología Agropecuaria, 2002).

En cuanto a las propiedades químicas del suelo, las más importantes son la acidez, fertilidad y cantidad de materia orgánica. La acidez se mide determinando el pH de la muestra; mientras más ácido sea el suelo su fertilidad va a ser menor y también tenderá a aumentar la posibilidad de presentar algunos elementos tóxicos como el aluminio, si por el contrario el suelo es muy alcalino puede presentar altos niveles de elementos nocivos como el sodio (Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), 2010). La materia orgánica se refiere a la descomposición de restos de plantas y animales, brindando una fuente de nutrientes y biomasa microbiana, la cual es considerada la parte viviente y activa de la materia orgánica (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Putumayo (Colombia) Programa Nacional de Transferencia de Tecnología Agropecuaria, 2002; Jia, Cao, Wang, & Wang, 2005; Bot & Benites, 2005).

La fertilidad se mide teniendo en cuenta la cantidad de nutrientes que presenta el suelo, los cuales son necesarios para el desarrollo y crecimiento de las plantas. Entre los elementos más importantes se encuentran el nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio y calcio, estos son considerados nutrientes mayores o macronutrientes, dado que se requieren en una mayor cantidad, por otra parte, dentro de los nutrientes menores o micronutrientes se encuentran el zinc, hierro, manganeso, cobre, molibdeno entre otros (Raven, Evert, & Eichhorn, 2005). Se profundizará acerca de las funciones de los macro y micronutrientes en las plantas en el siguiente apartado.

3.2.6 FERTILIDAD DEL SUELO: LA IMPORTANCIA DE LOS MACRO Y MICRONUTRIENTES PARA LAS PLANTAS

La nutrición de las plantas involucra el consumo de determinados elementos, que son esenciales para los procesos bioquímicos, el metabolismo y crecimiento; la presencia de estos elementos en las plantas es el reflejo de la composición del suelo en el cual se están desarrollando y en su mayoría son absorbidos en forma de iones inorgánicos provenientes de la solución del suelo (Raven, Evert, & Eichhorn, 2005).

Estos elementos esenciales se dividen en micro y macronutrientes de acuerdo a las cantidades requeridas por las plantas; los primeros se denominan así, por que se requieren en pequeñas cantidades (aproximadamente 100 mg/kg de materia seca) y los macronutrientes, por que se requieren en concentraciones mayores o

iguales a 1000 mg/kg de materia seca (Raven, Evert, & Eichhorn, 2005). Con pocas excepciones, estos elementos esenciales deben estar en su forma de iones inorgánicos en la solución del suelo para poder pasar a través de las raíces de las plantas a medida que éstas absorben el agua. El nitrógeno, por su parte, requiere de la acción de los microorganismos para su conversión a nitrato o amonio que son las dos formas disponibles para las plantas (Rosen, Bierman, & Eliason, 2008; Buol, 2008).

El listado de los micro y macronutrientes y sus funciones se detallan en el anexo 4.

3.2.7 MÉTODOS DE MUESTREO DE SUELO

La metodología empleada para determinar las características físicas y químicas del suelo tiene diferentes etapas como: definición de la unidad de muestreo, delimitación del terreno, toma de submuestras y análisis de muestras en el laboratorio. Al definirse las unidades de muestreo del proyecto se procede con la delimitación de un terreno homogéneo para la toma de las muestras de suelo, cada muestra de suelo es una muestra “compuesta” por varias submuestras, las cuales se deben tomar dentro del terreno homogéneo de forma aleatoria y luego mezclarse uniformemente; luego de realizar la mezcla se introduce aproximadamente 1 kilo de muestra en una bolsa plástica hermética y se rotula con el nombre, ubicación, fecha y otros datos que el investigador considere pertinentes. Antes de tomar las submuestras debe removerse del terreno la hojarasca y demás residuos que se encuentren, posteriormente, se introduce la pala hasta obtener una profundidad de 20 cm y se toma de la pared del hueco realizado una porción aproximada de 300 gr, es importante tener en cuenta ciertas recomendaciones como limpiar los materiales al tomar cada submuestra, no realizar el muestreo cerca de caminos, viviendas, estanques etc. y evitar la manipulación de alimentos u otros elementos que puedan contaminar la muestra (Osorio, 2006; Hazelton & Murphy, 2007; Rosen, Bierman, & Eliason, 2008).

3.2.8 EL SUELO Y LOS PROCESOS DE SUCESIÓN

La composición del suelo y su caracterización fisicoquímica pueden reflejar diferentes estados sucesionales de los bosques; en suelos que han sufrido deforestación se ha demostrado que sus propiedades fisicoquímicas cambian y afectan el crecimiento y la composición de especies que colonizan, entre los cambios más perjudiciales se encuentra la pérdida de materia orgánica, con consecuentes efectos negativos en la fertilidad del suelo (Guariguata & Ostertag, 2000). Aunque los estudios sucesionales generalmente se centran en los cambios presentados en la vegetación, en los últimos años se han estudiado otras características importantes como los cambios en las propiedades de los suelos.

En estudios realizados en China en sucesión de bosques secundarios se encontró que existía una correlación positiva entre el pH y la densidad, y estas dos variables disminuían ligeramente con la extensión de los estados sucesionales, por otra parte, la humedad se incrementaba gradualmente con el gradiente de sucesión y se encontró además que durante la sucesión secundaria el carbono orgánico se incrementaba rápidamente y alcanzaba su máximo en bosques de 17 años, pero luego disminuía y se volvía constante (Jia, Cao, Wang, & Wang, 2005); en otro estudio realizado en México, al comparar la vegetación y propiedades del suelo en dos bosques tropicales secos con diferente estado regeneracional (10 y 60 años) no se encontraron diferencias significativas en el carbono orgánico y nitrógeno total del suelo (Ceccon, Olmsted, & Campo, 2002).

Finalmente, en un estudio realizado en bosques de madera jóvenes y maduros en el oeste de Virginia (USA) no se encontraron diferencias significativas relacionadas con la edad de los bosques para variables como el pH, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico y nutrientes, estos resultados sugieren que hay un cambio mínimo en la disponibilidad de nutrientes entre bosques recuperados de perturbaciones de 20 y 80 años, y también se observa la importancia de la descomposición de la materia orgánica como fuente de nutrientes en los bosques después de ocasionada la perturbación y se sugiere que esta importancia disminuye con el tiempo (Gilliam & Adams, 1995).

3.2.9 APORTE CRÍTICO

El análisis de suelo al ser un área de estudio en desarrollo puede proporcionar elementos importantes para determinar la efectividad de la restauración y en caso de obtenerse los resultados esperados puede seguir utilizándose este tipo de estudios en casos similares. El método de muestreo permite la realización de un trabajo de campo en poco tiempo y los análisis de laboratorio se obtienen en aproximadamente 20 días, proporcionándole al investigador un mejor uso del tiempo para el análisis de los resultados obtenidos. Finalmente, gran parte del éxito de los estudios de suelos radica en la representatividad de la muestra y evitar cometer errores que puedan distorsionar los resultados de los análisis de laboratorio.

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar la efectividad de las estrategias de restauración implementadas en el corredor Barbas - Bremen, a partir de la caracterización fisicoquímica del suelo.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

4.2.1 Determinar las características fisicoquímicas del suelo (pH, materia orgánica, nutrientes y textura) en los diferentes puntos de muestreo y asociar los resultados con el desarrollo actual de los corredores.

4.2.2 Comparar la composición del suelo en los diferentes puntos de muestreo.

4.3.3 Comparar la composición del suelo con la caracterización realizada en años anteriores.

5. METODOLOGÍA

5.1 ÁREA DE ESTUDIO

El corredor Barbas-Bremen se encuentra entre los 1700 y 2100 msnm y está ubicado entre los municipios de Filandia (Quindío) y Pereira (Risaralda), en la vertiente occidental de la Cordillera Central ($75^{\circ}39'38''\text{W}/4^{\circ}42'47''\text{N}$ y $75^{\circ}35'42''\text{W}/4^{\circ}40'48''\text{N}$) (ver figura 1); cuenta con una extensión de 68 Ha y está compuesto por cuatro conexiones con aproximadamente 100 metros de ancho, que vinculan el cañón del río Barbas con la Reserva Forestal de Bremen; el cañón del río Barbas tiene un área en bosques de 790 Ha, y la Reserva Forestal Bremen 747 Ha (Vargas W. G., 2008). Para los puntos de muestreo se tendrán en cuenta tres elementos del paisaje: los corredores (Monos, Pavas y Colibríes), los potreros adenaños a los corredores y los dos fragmentos de bosque maduro (Barbas y Bremen) (ver figura 2).

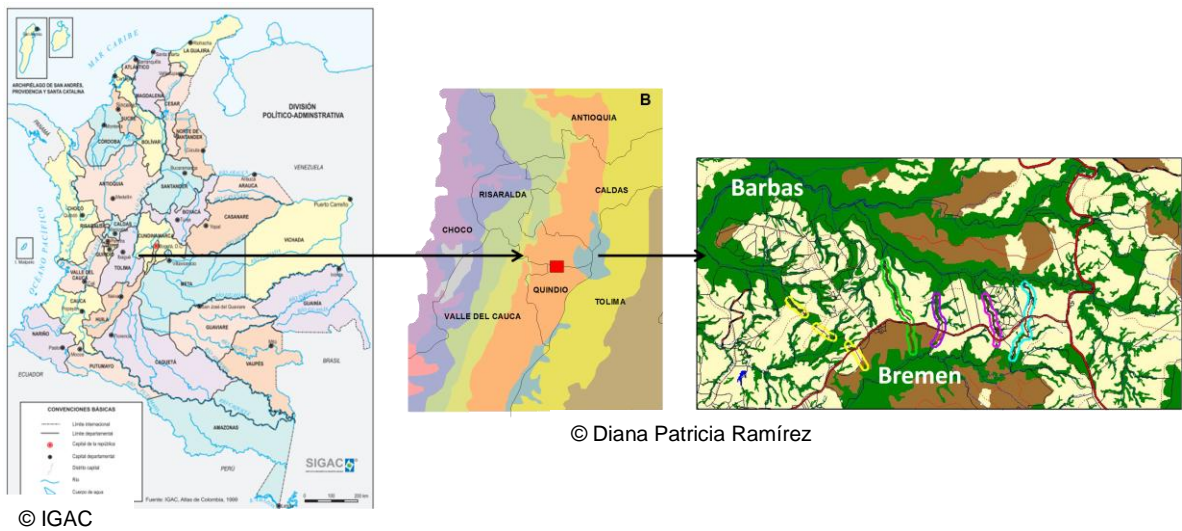
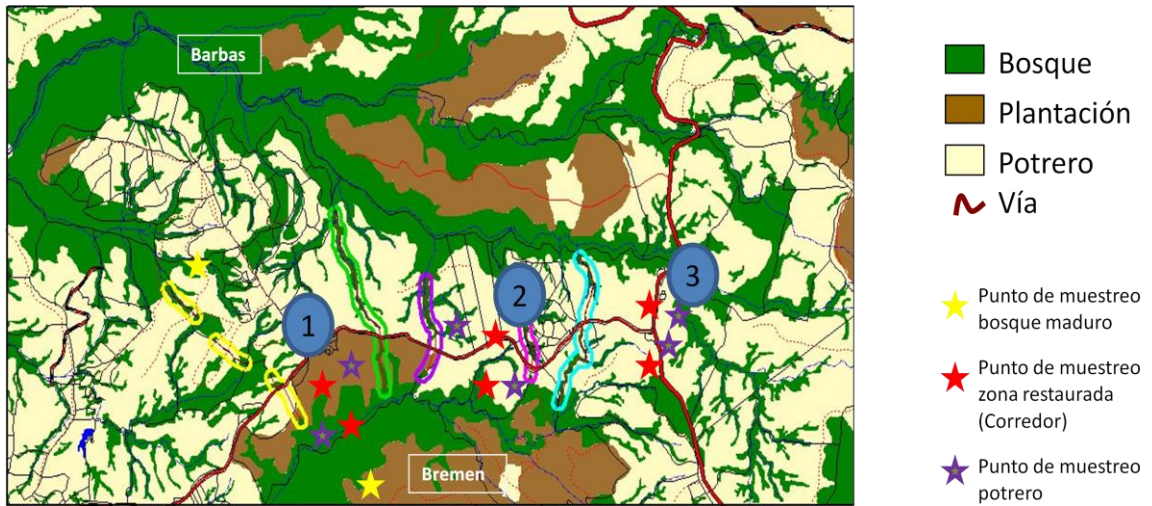


Figura 1. Área de estudio



© Diana Patricia Ramírez

1. Corredor Los Monos 2. Corredor Las Pavas 3. Corredor Los Colibríes

Figura 2. Puntos de muestreo en los tres elementos del paisaje: bosque maduro, zona restaurada (corredor) y potrero aledaño a los corredores.

5.2 MÉTODOS DE MUESTREO

El muestreo se realizó en los tres elementos del paisaje indicados en el punto anterior, teniendo en cuenta ambos lados de la carretera, las muestras se tomaron en época de verano, utilizando la metodología indicada para el análisis de suelo (Osorio, 2006) con 3 submuestras para cada punto de muestreo, dado que se debía encontrar un área lo más homogénea posible (ver figura 3); posteriormente se mezclaron las 3 submuestras para obtener una muestra compuesta y se empacó aproximadamente un kilo en una bolsa con cierre hermético para preservar la calidad de la muestra y evitar algún tipo de contaminación. Para cada muestra se tomaron datos de coordenadas, fecha y hora (ver anexo 5) con el fin de tener la posibilidad de realizar estudios posteriores en las mismas ubicaciones y así determinar cambios más precisos en la composición del suelo en el proceso sucesional.



Figura 3. Procedimiento de muestreo en el Corredor los Monos.1, Determinación de un área homogénea. 2, Remoción de la hojarasca en un área de 40cm x 40 cm y demarcación del área determinada para tomar la submuestra. 3, Excavación utilizando un palín hasta obtener una profundidad de 20 cm. 4, Acercamiento de la excavación del punto de muestreo.

5.3 PROCESAMIENTO DE LAS MUESTRAS

La caracterización fisicoquímica se realizó en el laboratorio de servicios analíticos del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), donde se determinaron las siguientes características fisicoquímicas: pH, aluminio, materia orgánica, fósforo, calcio, magnesio, potasio, sodio, boro, azufre, cobre, hierro, manganeso, zinc, capacidad de intercambio catiónico (CIC), % de arena, limo, arcilla y textura. Los métodos por los cuales se determinaron las características anteriores se detallan en la anexo 6.

5.4 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Se realizará un análisis multivariado de los datos, mediante la elaboración de clústers, utilizando el software Minitab 16, cuya finalidad es indicar la similitud entre los diferentes puntos de muestreo. Adicionalmente se calcularán el porcentaje de nitrógeno total, el porcentaje de nitrógeno asimilable y el porcentaje de carbono a partir de la materia orgánica (USDA Natural Resources Conservation Service, 2009), el porcentaje de saturación de bases total y el porcentaje de saturación de bases individual a partir de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) (Buol, 2008), utilizando las siguientes fórmulas:

5.5 RESULTADOS ESPERADOS

De haber sido efectivas las estrategias de restauración se espera que los contenidos de materia orgánica, nitrógeno y carbono de las áreas restauradas tengan mayor similitud a los resultados de las áreas de bosque, mientras que los potreros, al no tener ningún tipo de manejo, deberán mostrar mayor lejanía a los contenidos de los bosques. Cabe anotar que como las muestras de suelo analizadas en los tres elementos del paisaje provienen del mismo material parental, han de tener una composición similar y algunas variables consideradas inherentes puede que no exhiban diferencias significativas.

6. RESULTADOS

Tabla 1. Características fisicoquímicas del suelo para los tres elementos del paisaje en el muestreo realizado en agosto 2012: BM1 y BM2 (bosque maduro Bremen y bosque maduro Barbas respectivamente); PA1, PA2, MO1, MO2, CO1, CO2 (PA: Corredor las Pavas, MO: Corredor los Monos y CO: Corredor los Colibríes; los números 1 y 2 indican la orientación del corredor hacia Barbas y hacia Bremen respectivamente); PAP1, PAP2, MOP1, MOP2, COP1 y COP2 (PAP: potrero aledaño al Corredor las Pavas, MOP: potrero aledaño al Corredor los Monos y COP: potrero aledaño al Corredor los Colibríes; los números 1 y 2 indican la orientación del potrero hacia Barbas y hacia Bremen respectivamente).

Muestra	pH	Al (cmol/kg)	MO (%)	P-Brayll (ppm)	Ca (cmol/kg)	Mg (cmol/kg)	K (cmol/kg)	Na (cmol/kg)	CIC (cmol/kg)	B (ppm)	S (ppm)	Cu (ppm)	Fe (ppm)	Mn (ppm)	Zn (ppm)	Textura
BM1	5,23	0,90	16,09	2,89	2,11	0,44	0,16		29,10	0,34	78,33	0,07	5,03	10,65	2,25	FA
BM2	4,91	1,25	22,27	2,39	5,24	0,44	0,22		41,60	0,63	74,23	0,03	9,37	23,80	3,56	FA
PA1	5,67		8,43	1,13	0,66	0,22	0,08	0,02	30,40	0,08	62,02	0,12	9,17	7,84	1,40	FA
PA2	5,08	1,30	14,50	3,08	0,26	0,15	0,16		31,20	0,31	75,28	0,15	16,28	6,28	1,34	FA
MO1	5,49	0,95	15,84	1,43	0,36	0,23	0,14		28,80	0,21	56,97	0,13	19,54	6,62	1,30	FA
MO2	4,99	0,80	12,90	2,19	0,38	0,10	0,08		29,50	0,16	78,23	0,17	18,06	5,23	1,34	FA
CO1	5,14	0,55	8,79	3,54	0,68	0,15	0,11		33,50	0,17	95,48	0,51	17,52	4,64	5,52	FA
CO2	5,11	0,85	17,86	7,55	1,50	0,26	0,14		38,30	0,31	100,74	0,16	8,27	36,88	13,15	FA
PAP1	6,01		6,86	3,82	1,59	0,55	0,11	0,03	26,10	0,14	45,19	0,48	7,88	11,40	0,82	FA
PAP2	6,03		3,64	2,84	0,98	0,15	0,12	0,04	20,25	0,13	81,10	0,14	6,93	2,36	0,79	FA
MOP1	5,60		12,64	3,80	0,16	0,11	0,18	0,04	26,50	0,46	26,51	0,18	7,41	2,43	2,53	FA
MOP2	5,29	0,50	10,96	2,31	0,88	0,39	0,20		28,10	0,34	26,72	0,29	4,70	5,77	1,36	FA
COP1	5,53		9,81	9,25	2,26	0,68	0,27	0,05	25,00	0,36	133,60	0,22	9,17	8,20	13,18	FA
COP2	4,94	0,45	11,05	33,44	2,05	0,58	0,21		24,10	0,48	63,04	0,81	14,59	11,93	13,18	FA

*FA: francoarenoso

Fuente: CIAT

Tabla 2. Características fisicoquímicas del suelo para los tres elementos del paisaje en el muestreo realizado en Septiembre 2005: LA1, LA2 MO1, MO2, PA2A, PA2B, CO1, CO2 (LA: Corredor Laureles, MO: Corredor los Monos, PA: Corredor las Pavas y CO: Corredor los Colibríes; los números 1 y 2 indican la orientación del corredor hacia Barbas y hacia Bremen respectivamente y las letras A y B indican alto y bajo respectivamente); P1 y P2 (P: potrero; los números 1 y 2 indican la orientación del potrero hacia Barbas y hacia Bremen respectivamente) y PI2 (muestra tomada debajo del cultivo de pino hacia Bremen).

Muestra	pH	Al (cmol/kg)	MO (%)	P (ppm)	K (cmol/kg)	Ca (cmol/kg)	Mg (cmol/kg)	B (ppm)	S (ppm)	Cu (ppm)	Fe (ppm)	Mn (ppm)	Zn (ppm)	Textura
LA1	4,8	1,5	19,1	3	0,17	0,3	0,2	0,44	8,20	2	101	12	3	FA
LA2	4,9	1,4	20,3	5	0,21	1,5	0,3	0,26	2,61	3	56	9	5	FA
MO1	5,2	0,0	19,6	4	0,22	0,5	0,2	1,00	7,30	3	102	8	4	FA
MO2	5,0	0,6	22,5	7	0,26	5,6	0,7	0,57	10,4	3	164	20	11	FA
PA2A	5,2	0,0	14,0	4	0,08	0,1	0,1	0,39	10,8	1	158	8	1	FA
PA2B	4,7	1,1	15,6	6	0,07	0,3	0,1	0,26	8,50	4	160	10	2	FA
CO1	4,9	0,9	20,5	10	0,33	1,1	0,6	0,68	12,7	5	459	32	14	AF
CO2	4,9	0,9	18,9	13	0,22	1,1	0,5	0,45	16,1	3	371	8	10	AF
P1	5,0	1,1	8,8	3	0,11	1,7	0,2	0,19	1,79	3	130	16	4	F
P2	5,2	0,0	9,7	5	0,08	0,6	0,1	0,20	1,40	3	93	11	2	F
PI2	5,0	0,6	13,1	4	0,10	0,1	0,1	0,27	5,16	4	182	3	1	FA

*FA: francoarenoso **AF: arenoso franco ***F: franco

Fuente: ICA

Tabla 3: Cálculo del porcentaje nitrógeno, porcentaje de carbono, porcentaje de saturación de bases y relación Ca/Mg para los datos correspondientes al muestreo de 2012.

Muestra	MO (%)	NT ¹ (%)	NA ² (%)	C ³ (%)	% Sat ⁴ Bases	% Sat Ca	% Sat Mg	% Sat K	Ca/Mg
BM1	16,09	0,80	0,012	9,33	9,28	7,24	1,51	0,53	4,79
BM2	22,27	1,11	0,017	12,91	14,18	12,60	1,06	0,52	11,94
PA1	8,43	0,42	0,006	4,89	3,25	2,17	0,73	0,27	2,98
PA2	14,50	0,72	0,011	8,41	1,81	0,83	0,48	0,50	1,75
MO1	15,84	0,79	0,012	9,19	2,51	1,25	0,79	0,47	1,58
MO2	12,90	0,65	0,010	7,48	1,90	1,29	0,34	0,26	3,76
CO1	8,79	0,44	0,007	5,10	2,77	2,02	0,44	0,32	4,62
CO2	17,86	0,89	0,013	10,36	4,95	3,90	0,67	0,37	5,82
PAP1	6,86	0,34	0,005	3,98	8,71	6,08	2,11	0,42	2,89
PAP2	3,64	0,18	0,003	2,11	6,36	4,86	0,72	0,60	6,77
MOP1	12,64	0,63	0,009	7,33	1,84	0,61	0,40	0,67	1,51
MOP2	10,96	0,55	0,008	6,36	5,24	3,12	1,40	0,72	2,24
COP1	9,81	0,49	0,007	5,69	13,05	9,04	2,74	1,07	3,30
COP2	11,05	0,55	0,008	6,41	11,79	8,50	2,42	0,87	3,52

1. NT: Nitrógeno total 2. NA: Nitrógeno asimilable 3. C: Carbono 4. % Sat bases: % saturación de bases

Tabla 4: Cálculo del porcentaje de nitrógeno, porcentaje de carbono y relación Ca/Mg para los datos correspondientes al muestreo de 2005.

Muestra	MO (%)	NT (%)	NA (%)	C (%)	Ca/Mg
LA1	19,1	0,96	0,014	11,08	1,50
LA2	20,3	1,02	0,015	11,77	5,00
MO1	19,6	0,98	0,015	11,37	2,50
MO2	22,5	1,13	0,017	13,05	8,00
PA2A	14,0	0,70	0,011	8,12	1,00
PA2B	15,6	0,78	0,012	9,05	3,00
CO1	20,5	1,03	0,015	11,89	1,83
CO2	18,9	0,95	0,014	10,96	2,20
P1	8,8	0,44	0,007	5,10	8,50
P2	9,7	0,49	0,007	5,63	6,00
PI2	13,1	0,66	0,010	7,60	1,00

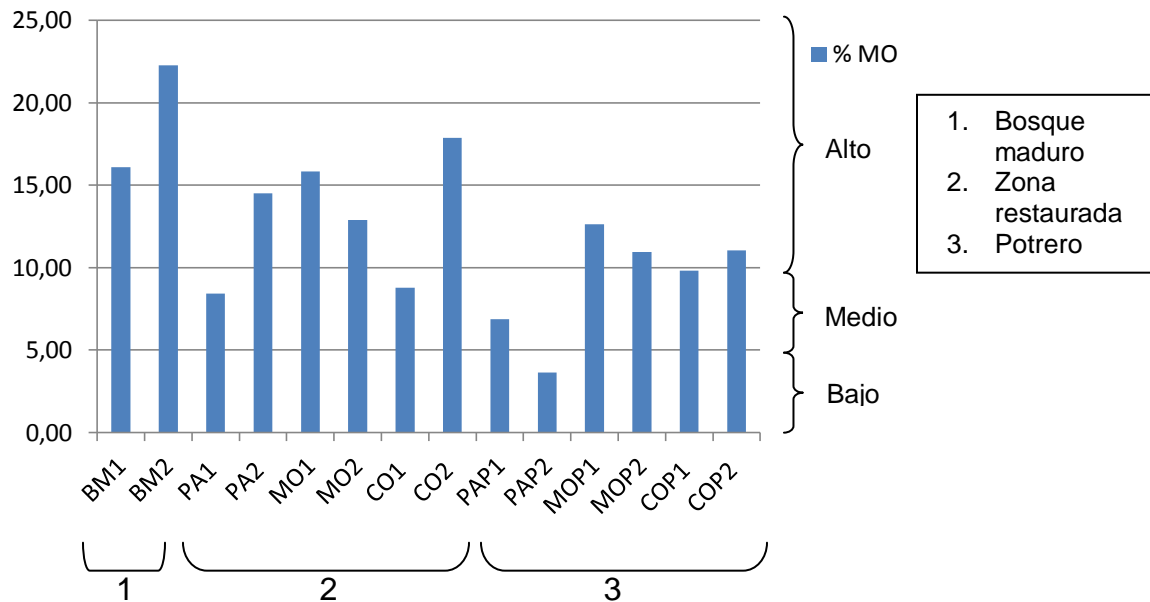


Figura 4: Porcentaje (%) de materia orgánica correspondiente al muestreo realizado en el año 2012. En esta gráfica se observa el cambio en el nivel de materia orgánica en los tres elementos del paisaje analizados; los niveles más elevados corresponden al bosque, seguido de la zona restaurada y finalmente los potreros exhiben en promedio los niveles más bajos. Estos resultados son acordes a lo expuesto por la literatura en los procesos sucesionales.

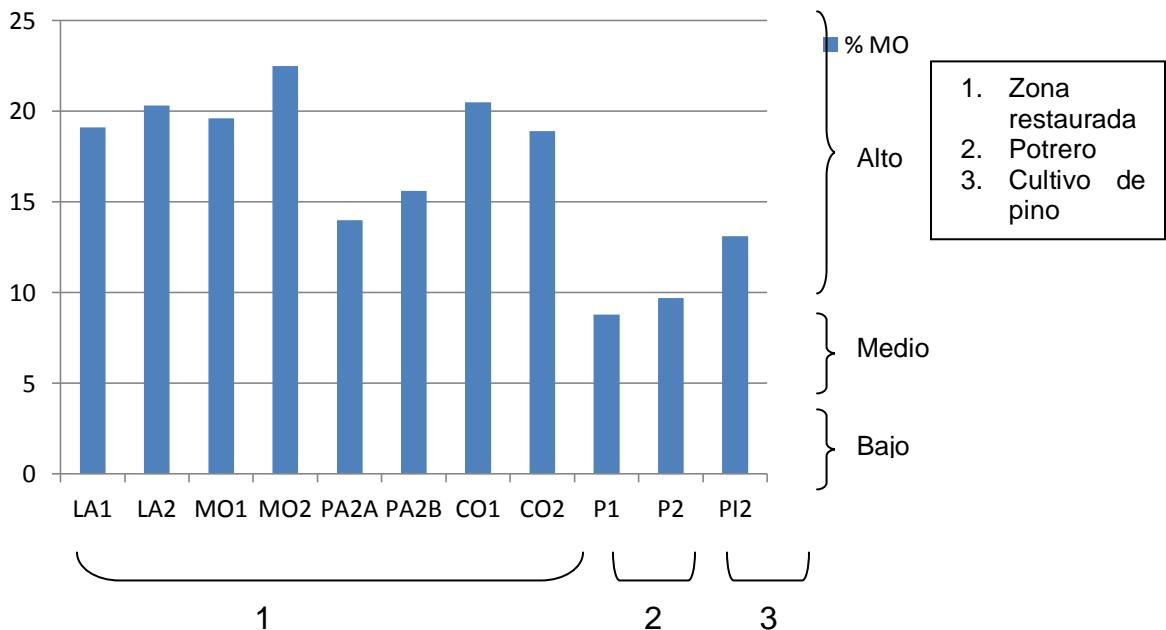


Figura 5: Porcentaje (%) de materia orgánica correspondiente al muestreo realizado en el año 2005. En la gráfica se observan niveles elevados de materia orgánica para todas las zonas restauradas, debido posiblemente al manejo que tuvieron las pasturas, mientras que por el contrario, los potreros presentan niveles medios.

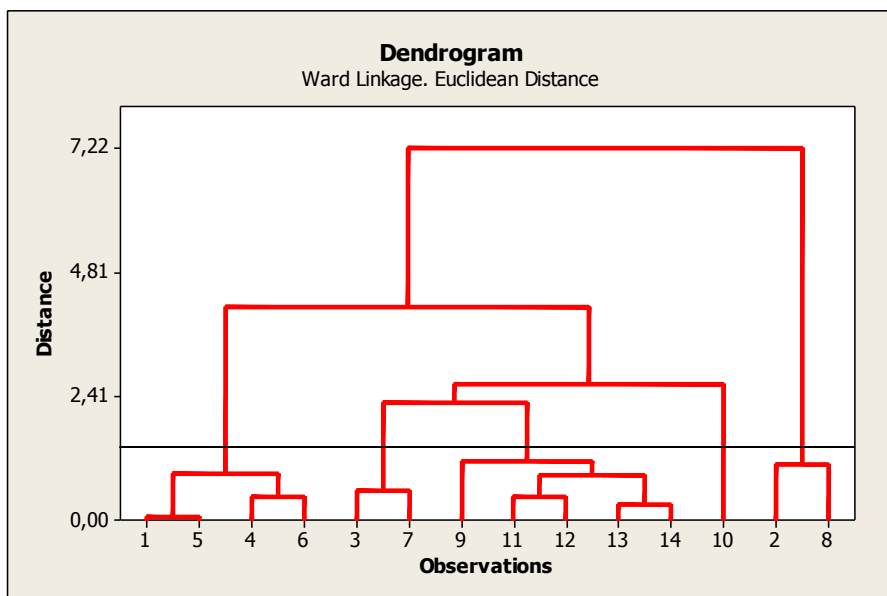


Figura 6: Clúster elaborado con las variables porcentaje de materia orgánica y CIC para los datos de 2012. A una distancia de aproximadamente 1,2 se formaron 5 clústers, de los cuales el primero está compuesto por zonas restauradas y bosque maduro, el segundo incluye zonas restauradas, el tercero agrupa potreros y el quinto agrupa zona restaurada y bosque maduro. Estos resultados demuestran en parte el éxito que está teniendo la restauración, ya que la zona restaurada se está asemejando más al bosque que al potrero.

Tabla 5. Equivalencias en el diagrama de clúster

Muestra	Nº
Bosque maduro Bremen	1
Bosque maduro Barbas	2
Corredor Pavas (Barbas)	3
Corredor Pavas (Bremen)	4
Corredor Monos (Barbas)	5
Corredor Monos (Bremen)	6
Corredor Colibríes (Barbas)	7
Corredor Colibríes (Bremen)	8
Potrero Corredor Pavas (Barbas)	9
Potrero Corredor Pavas (Bremen)	10
Potrero Corredor Monos (Barbas)	11
Potrero Corredor Monos (Bremen)	12
Potrero Corredor Colibríes (Barbas)	13
Potrero Corredor Colibríes (Bremen)	14

Tabla 6: Clústers formados a una distancia de aproximadamente 1,2

Clúster	Observaciones
1	1 5 4 6
2	3 7
3	11 12 13 14 9
4	10
5	2 8

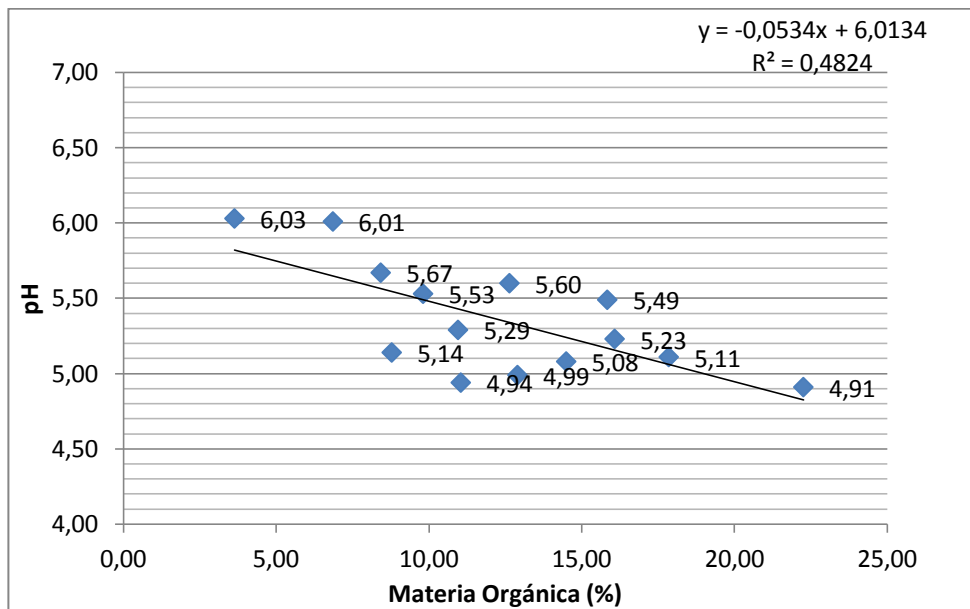


Figura 7. Relación entre pH y materia orgánica (%) para los datos de 2012. En la gráfica se observa una relación negativa entre las variables, donde la materia orgánica explica en un 48% los cambios en el pH. Estos resultados son acordes a lo expuesto en la literatura y se observa claramente que los niveles más altos de materia orgánica (22,27%), están asociados a pH's más bajos (4,91)

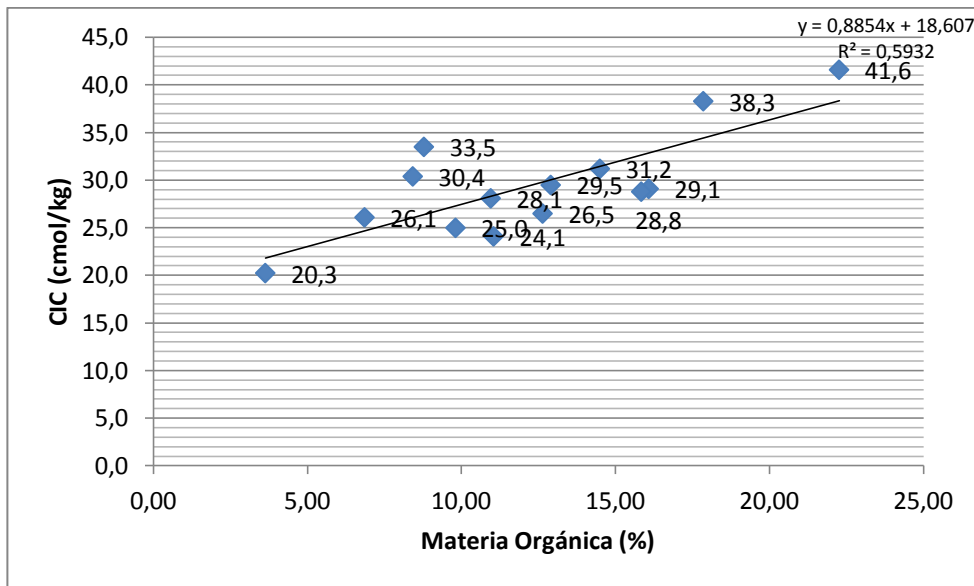


Figura 8. Relación entre la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y la materia orgánica (%) para los datos de 2012. En esta gráfica se observa la relación positiva entre los dos variables acorde a lo expresado en la literatura. Niveles elevados de materia orgánica están asociados con niveles altos de CIC.

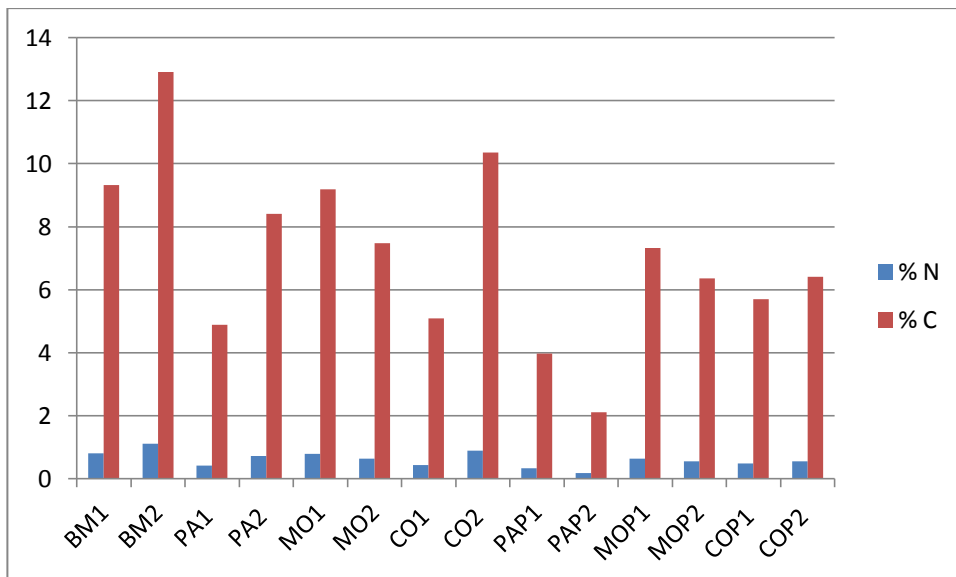


Figura 9. Porcentaje de nitrógeno y carbono para los datos de 2012. En la gráfica se observa la variación en los niveles de nitrógeno y carbono a lo largo de la sucesión. Los dos primeros datos que corresponden al bosque maduro exhiben los niveles más altos, seguido de la zona restaurada, que corresponde a los seis siguientes datos y finalmente los últimos seis datos pertenecientes a los potreros son los que presentan los niveles más bajos de estos dos elementos.

7. DISCUSIÓN

7.1 TEXTURA

La textura del suelo se define como la proporción relativa de partículas como la arena (0,05 - 2mm), el limo (0,002 - 0,05 mm) y la arcilla (menor a 0,002 mm) presentes en la muestra de suelo e indica ciertas características como la facilidad con que se trabaja el suelo, la cantidad de agua o aire que puede llegar a retener y además la velocidad con que el agua puede penetrarlo y atravesarlo (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO), 2006; Hernandez, Hoyos, & Hoyos, 2011).

Los suelos con una mayor proporción de arena, tienen un área superficial por gramo de suelo relativamente más bajo y espacios más grandes entre las partículas, de esta forma, el agua exhibe un buen drenaje y permanece únicamente en la superficie de las partículas y en los hendiduras entre ellas, además debido a esta característica, estos suelos presentan una baja capacidad de campo, que se refiere a la capacidad de mantener la humedad (mide el contenido de agua que el suelo es capaz de retener luego de haber sido saturado y de permitirse su drenaje) y en el caso particular de suelos arenosos es de aproximadamente 3%, es decir, sólo este bajo porcentaje de agua por volumen es retenido por el suelo después de la saturación; otra característica del suelo que depende en parte de su tipo y contenido de agua es la conductividad hidráulica, la cual es una medida de la facilidad con que el agua puede moverse a través del suelo y en referencia a los suelos arenosos presenta valores altos, debido a los grandes espacios presentes entre las partículas (Taiz & Zeiger, 2010). En el caso contrario, los suelos arcillosos tienen un área superficial mayor y los espacios entre partículas son más pequeños, presentando un baja capacidad de drenaje y baja capacidad hidráulica, adicionalmente, su capacidad de campo es mayor, es decir, pueden llegar a retener hasta un 40% de agua por volumen pocos días después de haber sido saturados (Taiz & Zeiger, 2010).

De acuerdo al porcentaje de arena, limo y arcilla encontrado en el suelo de los tres elementos del paisaje analizados en agosto de 2012, la textura se clasifica como franco arenosa, debido a que presenta un mayor porcentaje de arena y además se encuentran limo y arcilla en proporciones similares, suministrándole a las partículas más coherencia (Brown R. B., 1990). Para interpretar los datos provenientes del análisis físico se utiliza el triángulo textural propuesto por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA), con el que de acuerdo al porcentaje de partículas encontradas se puede clasificar la muestra en cualquiera de las 12 texturas existentes.

Para todos los elementos del paisaje la textura del suelo resultó ser franco arenosa, lo cual es coherente con lo expresado en la literatura, debido a que esta característica física es considerada inherente, es decir, cambia poco o nada con el manejo que se le proporcione al suelo dado que es una propiedad que se forma en miles de años y resulta de factores como el clima, la topografía, el material parental, la biota y el tiempo (United States Department of Agriculture (USDA), 2009).

Al analizar el tipo de textura es necesario tener en cuenta la temperatura y precipitación promedio anual de la zona, que en el caso de Filandia, se encuentra en 18 °C y 2829 mm respectivamente (Diaz, Alvarado, Roveda, Mendivelso, & Useche, 2004; Alcaldía Municipal Filandia Quindío , 2011); esta precipitación elevada y su temperatura ubica al municipio en dos pisos climáticos, frío húmedo y templado húmedo (Alcaldía Municipal de Filandia), que son coherentes con la textura del suelo, dado que al tener una mayor proporción de arena, su drenaje va a ser alto y aunque en ciertos periodos del año las precipitaciones sean elevadas, el suelo no se va a sobresaturar o anegar, cabe anotar que en las zonas más elevadas y frías persisten minerales arcillosos amorfos como la alófana, cuya retención de la humedad es muy alta, teniendo como consecuencia que al presentarse altas precipitaciones, estos suelos permanecen saturados la mayoría del tiempo con desalojo de aire, inhibiéndose el desarrollo radical de ciertos cultivos como las hortalizas (Bernal Alvarez, 1986) .

Es importante tener en cuenta que el método utilizado para determinar la textura del suelo fue el de Bouyoucos (ver anexo 6), el cual se fundamenta en la velocidad diferencial de sedimentación de las partículas del suelo (arena, arcilla y limo) con base en el tamaño, peso y medio en que sedimentan, se requiere tamizar la muestra y pretratarla con compuestos químicos que permitan la separación de las uniones cohesivas que presentan las partículas y así garantizar su dispersión (Nuñez, 1996). Para los suelos derivados de cenizas volcánicas este método no es el más apropiado debido a que no se logra la dispersión completa del material amorfo (alófana), dado que ésta tiende a flocularse alrededor de las partículas de limo, formando pseudoarenas que erróneamente entran a formar parte de la fracción de arenas (Diaz, Alvarado, Roveda, Mendivelso, & Useche, 2004).

7.2 pH

El pH se define como el logaritmo negativo en base 10 de la concentración de protones $[H^+]$ ($pH = -\log[H^+]$) y su medición en el suelo indica acidez o alcalinidad, la escala de pH se encuentra entre 0 y 14, donde un pH de 7 es neutro, por debajo de este valor se considera ácido y por encima básico (Brown, LeMay, Bursten, & Murphy, 2009; USDA Natural Resources Conservation Service, 2011). Este indicador es de gran relevancia en estudios de suelos, debido a que se encuentra asociado con la actividad microbiana, la disponibilidad de nutrientes para las

plantas (ver anexo 15), la interacción de pesticidas, la movilidad de metales pesados y la corrosividad. En términos generales un pH entre 6 y 7 es el más favorable para el crecimiento vegetal, aunque debe tenerse en cuenta que las diferentes especies de plantas varían en cuanto a sus requerimientos de pH, respecto a la actividad microbiana un pH entre 6,6 y 7,3 es el más adecuado debido a que contribuye a la disponibilidad de nitrógeno, azufre y fósforo en el suelo (USDA Natural Resources Conservation Service, 1998).

La disminución en el pH puede deberse a varios factores como el ácido carbónico producido cuando se forma dióxido de carbono proveniente de la descomposición de la materia orgánica y de la respiración radicular, la reacción de Al^{3+} con agua, las precipitaciones, la lluvia ácida, la nitrificación de amonio por fertilizantes y la mineralización de materia orgánica, (USDA Natural Resources Conservation Service, 2011).

El pH obtenido en los tres elementos del paisaje se encuentra en el rango de 4,91 y 6,03, es decir, suelos altamente ácidos a moderadamente ácidos de acuerdo a las clases de pH en suelos comúnmente aceptadas (USDA Natural Resources Conservation Service, 1998) (ver anexo 7).

Cuando el pH se encuentra por debajo de 5,5 (ver tabla 1) como es el caso del 83% de los corredores muestreados, el 100% del bosque maduro y el 33% de los potreros, generalmente tienen una baja disponibilidad de calcio, magnesio y fósforo y así mismo se puede incrementar la disponibilidad de aluminio, hierro y boro (USDA Natural Resources Conservation Service, 1998).

7.3 FERTILIDAD

Dentro de los indicadores más importantes para medir la fertilidad del suelo y factores asociados a ésta se encuentran la capacidad de intercambio catiónico (CIC), el tipo de suelo y la materia orgánica.

7.3.1 CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO (CIC)

La CIC es una medida de la capacidad del suelo para retener y liberar cationes como el Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} y Na^+ y está relacionada con la cantidad de materia orgánica y de arcilla presente, estas últimas tienen carga negativa, por lo que mientras más alto sea el contenido de arcilla y materia orgánica, mayor va a ser la capacidad de intercambio catiónico del suelo, pudiendo retener mejor los nutrientes necesarios para el desarrollo de las plantas. La CIC es relativamente constante a lo largo del tiempo a no ser que se adicione materia orgánica al suelo.

7.3.2 TIPO DE SUELO

La fertilidad también se encuentra relacionada con el tipo de suelo y material parental que lo origina. En el caso de Filandia, de acuerdo a un estudio realizado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), los suelos están clasificados en el orden andisoles, dentro de la consociación integrada por el subgrupo Acrudoxic Hapludands en un 85%, con inclusiones de Typic Hapludands (Perfil modal PQ-52 IGAC- ver anexo 14). Estos suelos se caracterizan por ser medianamente desarrollados, han evolucionado a partir de capas gruesas de cenizas volcánicas, son suelos profundos con buen drenaje, alta fertilidad, su pH se encuentra en el rango de fuerte a moderadamente ácido (generalmente menor de 6), su contenido de materia orgánica es elevado (entre 10-20%), tienen alta capacidad buffer, son pobres en elementos como el calcio, magnesio, fósforo y potasio y su textura es francoarenosa (Proyecto U.T.P - GTZ, 2001; Diaz, Alvarado, Roveda, Mendivelso, & Useche, 2004). Estos suelos derivados de cenizas volcánicas presentan horizontes superiores con alto contenido de materia orgánica, que se evidencia en el color pardo oscuro y pardo grisáceo muy oscuro y a medida que se hacen más profundos los horizontes, el contenido de materia orgánica disminuye, por lo que los colores predominantes son pardo y pardo amarillento (Diaz, Alvarado, Roveda, Mendivelso, & Useche, 2004).

Los andisoles son típicos de la zona cafetera colombiana y su evolución a partir de las cenizas volcánicas se deben a erupciones en las cordilleras central y occidental, los depósitos más antiguos provienen de los volcanes del Quindío y Páramo de Santa Rosa, mientras que los más recientes están relacionados con las erupciones de los volcanes del Ruiz, Tolima, Santa Isabel y Cerro Bravo (Proyecto U.T.P - GTZ, 2001). Aunque para algunos suelos los materiales provenientes de las erupciones han constituido aportes y cambios en las características fisicoquímicas, para la mayoría estas cenizas volcánicas constituyen el material parental y por consiguiente han definido sus propiedades físicas, químicas y mineralógicas (Proyecto U.T.P - GTZ, 2001).

Al interpretar el análisis de suelos realizado tanto en el 2005 como en el 2012 (ver tabla 1 y 2) y compararlos con los niveles óptimos de las bases intercambiables (ver anexo 10), se observa una tendencia a niveles bajos con pocas excepciones de niveles medios; en cuanto al fósforo, este elemento presenta niveles bajos para todos los datos de 2005 y 2012 a excepción de un dato de 2012 en el potrero aledaño al corredor colibríes que exhibe un nivel medio, estos bajos niveles de fósforo disponible en el suelo son comunes en suelos volcánicos, donde la unión de este elemento con la arcilla resulta en altas tasas de retención de fósforo (Holl, 1999). La presencia de niveles similares de nutrientes en los tres elementos del paisaje se puede relacionar con lo expresado anteriormente sobre las características del tipo de suelo al que pertenecen las muestras y que todas se derivan del mismo material parental, por lo que posiblemente los nutrientes

pueden ser un reflejo de éste y no proporcionan diferencias que permitan determinar el proceso sucesional de la restauración.

Con relación a los niveles bajos de bases intercambiables, se presenta también un nivel bajo del porcentaje de saturación de bases para el calcio, magnesio y potasio en los datos de 2012 (ver tabla 3 y anexo 12).

Dentro de algunos estudios que corroboran los resultados obtenidos, en cuanto a niveles de nutrientes, se encuentra uno realizado en Estados Unidos sobre los cambios en la materia orgánica y el contenido de nutrientes luego de la tala de madera, el cual no muestra patrones sucesionales en las concentraciones de magnesio, potasio y nitrógeno (Covington, 1981). Aunque los cambios observados en los nutrientes del suelo a lo largo del desarrollo de la sucesión no siempre son aparentes y en algunos casos los resultados difieren (algunos estudios concluyen disminución o aumento de nutrientes del suelo con la edad del bosque), esto puede deberse a factores como las diferentes metodologías analíticas utilizadas, el tipo de bosque, tipo de suelo y el tipo de intensidad del uso del suelo, por ejemplo, la recuperación de carbono en el suelo es más rápida en bosques secundarios que se han regenerado a partir de pastizales que de campos agrícolas (Guariguata & Ostertag, 2000).

7.3.3 MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO

La materia orgánica del suelo puede considerarse como la suma de residuos de plantas y animales en diferentes estados de descomposición, las células y tejidos de los organismos del suelo y las sustancias bien descompuestas (McCauley, Jones, & Jacobsen, 2009). También se define como cualquier material producido originalmente por organismos vivos que regresa al suelo y experimenta el proceso de descomposición (Bot & Benites, 2005). Se encuentra relacionada con la capacidad del suelo para suministrar nutrientes debido a que, al derivarse principalmente de residuos vegetales, contiene todos los nutrientes esenciales de las plantas y además su porción orgánica estable, denominada humus, absorbe y retiene los nutrientes en una forma disponible para las plantas, es importante para el almacenamiento de agua, la liberación de gases invernadero, actúa como potenciador de las propiedades físicas y químicas del suelo, promueve la actividad biológica actuando como fuente de energía para los organismos descomponedores del suelo y mantiene la calidad ambiental, por todo lo anterior la materia orgánica se considera un indicador de la calidad y fertilidad del suelo (Guariguata & Ostertag, 2000; Rees, Ball, Campbell, & Watson, 2001; Astarai, 2008; Bot & Benites, 2005).

La materia orgánica depende de la continua descomposición de residuos vegetales y así contribuye a la actividad biológica y al ciclo del carbono y nitrógeno en el suelo (Zak, Grigal, Gleeson, & Tilman, 1990; Bot & Benites, 2005). La

dinámica de estos dos elementos tiene una regulación compleja que experimenta cambios durante la sucesión secundaria, de manera que dentro de este ciclo la fuente de materia orgánica y la disponibilidad de carbono y nitrógeno están controladas por la formación de materia orgánica a partir de la producción primaria y su pérdida está determinada por las actividades de organismos descomponedores; estos organismos del suelo utilizan la materia orgánica como fuente de alimento y a medida que la descomponen, los nutrientes en exceso como el nitrógeno, fósforo o carbono son liberados en el suelo en formas que las plantas los pueden utilizar (Zak, Grigal, Gleeson, & Tilman, 1990; Bot & Benites, 2005).

Estudios realizados acerca de la relación entre carbono, nitrógeno y procesos sucesionales, sugieren que el balance entre la producción de materia orgánica y su descomposición cambian de manera predecible durante la sucesión, de forma que se observa una disminución tanto del carbono como del nitrógeno en la sucesión temprana cuando se ha producido el abandono de campos agrícolas, generalmente en este caso se observa una disminución visible de la materia orgánica y posteriormente se produce la recuperación del carbono del suelo hasta alcanzar los niveles típicos del bosque maduro (Zak, Grigal, Gleeson, & Tilman, 1990; Nadporozhskaya, Mohren, Chertov, Komarov, & Mikhailov, 2006).

La sucesión temprana se caracteriza por presentar bajas tasas de producción primaria y altas tasas de descomposición que ocasionan una disminución del carbono y nitrógeno del suelo, cuando la sucesión se encuentra en su etapa media se empiezan a incrementar estos dos elementos a medida que la producción excede la descomposición y finalmente se alcanza un estado estable cuando las tasas de producción y descomposición son equivalentes en la sucesión tardía. Los estados sucesionales tardíos no se encuentran en equilibrio y no se consideran sistemas cerrados, sino que permanecen relativamente constantes, debido a que los inputs (materia orgánica disuelta y particulada, exudados de raíces) y los outputs (descomposición y exportación al suelo etc.) se encuentran balanceados y en caso de producirse una perturbación este balance se altera disminuyendo la materia orgánica del suelo (Covington, 1981).

Esto puede evidenciarse al analizar los contenidos en el porcentaje de N y C del suelo obtenidos a partir de los valores de la materia orgánica (ver tabla 3 y 4). En los potreros por ejemplo, presentan en promedio los porcentajes más bajos de estos elementos, la zona restaurada que corresponde a los corredores y que se encuentra en una etapa media de sucesión exhibe porcentajes más elevados de nitrógeno y carbono y en algunos casos se aproximan a los niveles del bosque maduro como ocurre en el corredor Colibrías hacia Bremen y finalmente los porcentajes más altos de estos dos elementos se encuentran en los bosques maduros (ver figura 9).

La materia orgánica tiene una relación negativa con el pH del suelo, debido a que al estar compuesta de sustancias húmicas como los ácidos húmicos y fúlvicos producidos por la acción descomponedora de los microorganismos ocasionan una disminución del pH, siendo una de las causas más importantes de acidificación del suelo (Sparks, 2003). Esta relación inversa se observa en la figura 7, donde se puede apreciar que el pH más bajo registrado (4,91) corresponde al bosque maduro de Bremen que cuenta con el mayor contenido de materia orgánica (22,27%) mientras que el pH más alcalino que se registró (6,03) corresponde a uno de los potreros aledaños al corredor las Pavas que cuenta con el menor contenido de materia orgánica (3,64%).

La materia orgánica también se encuentra relacionada con la capacidad de intercambio catiónico (CIC) en la medida en que esta última está influenciada por la cantidad y tipo de arcilla presente en el suelo y por la cantidad de materia orgánica descompuesta, las cuales tienen la propiedad de retener cationes, debido a la presencia de cargas negativas en su superficie, como sucede con las arcillas (Arias, 2001). Al observar la figura 8, se puede apreciar que el valor más elevado de CIC (41,60 cmol/kg), corresponde al bosque maduro de Bremen que tiene el mayor contenido de materia orgánica (22,27%), mientras que el valor más bajo de CIC (20,25 cmol/kg) corresponde al potrero aledaño al corredor las Pavas que cuenta con el menor contenido de materia orgánica (3,64%). Estos resultados coinciden con lo obtenido al analizar el pH en conjunto con la materia orgánica, por lo que se puede concluir que suelos con contenidos altos de materia orgánica tienen la tendencia a presentar pH bajos y capacidades de intercambio catiónico altas, lo cual es una corroboración de lo reportado en la literatura especializada.

La cantidad de materia orgánica en el suelo se ve influenciada tanto por factores naturales como antropogénicos. Dentro de los factores naturales se encuentra la temperatura, la humedad y textura del suelo, la topografía, la salinidad y acidez, la vegetación, la producción de biomasa y la erosión; este último factor puede producirse también por acción antropogénica (Bot & Benites, 2005; Hamer, 2010). Se ha encontrado que niveles elevados de humedad favorecen la producción de biomasa, proveyendo más residuos y por lo tanto más nutrientes para la biota del suelo, asimismo, la materia orgánica tiende a incrementarse a medida que los niveles de arcilla son más altos, debido a que la unión entre la materia orgánica y la superficie de las partículas de arcilla disminuyen la tasa de descomposición y favorecen la formación de agregados que actúan como protectores de la materia orgánica, en cuanto a la temperatura, los suelos de zonas frías tienen un mayor contenido de materia orgánica, debido a la menor actividad microbiana (Bot & Benites, 2005; Burbano & Silva, 2010).

En la zona de estudio, el clima se clasifica dentro de los pisos térmicos frío húmedo y templado húmedo con precipitaciones elevadas de aproximadamente 2829 mm al año, adicionalmente se encuentra un elemento arcilloso denominado alófana, con gran capacidad retenedora de humedad (Bernal Alvarez, 1986;

Alcaldía Municipal Filandia Quindío , 2011). Estas características favorecen los niveles elevados de materia orgánica presentes en el suelo de los diferentes elementos del paisaje analizados (ver tabla 1 y 2; anexo 8).

Dentro de los factores antropogénicos de mayor impacto sobre la materia orgánica del suelo se encuentran la erosión producida por malas prácticas agrícolas que ocasionan la disminución de los organismos descomponedores, esto a su vez conlleva a la degradación de la textura del suelo. Otro factor importante asociado a la disminución de la biota del suelo es la tala de bosques con fines agrícolas, entre sus efectos se cuentan la desaparición de la hojarasca y con ello una disminución en el número y variedad de organismos del suelo, lo cual es mucho más marcado en los trópicos. Asimismo, la hojarasca y los microorganismos del suelo disminuyen o desaparecen cuando se realiza la quema de la vegetación natural o de los residuos de cultivos, trayendo como consecuencia la disminución de la cantidad de materia orgánica que regresa al suelo. Finalmente, el sobrepastoreo reduce la densidad de la cobertura vegetal, incrementa la erosión y la compactación del suelo, disminuyendo la capa de materia orgánica presente (Bot & Benites, 2005).

Con base en este indicador e incluyendo la capacidad de intercambio catiónico, se realizó un análisis de clúster para los 14 sitios muestreados en agosto de 2012 (2 en bosque, 6 en zona restaurada-corredor y 6 en potrero aledaño al corredor) y se obtuvieron 5 clústers a una distancia aproximada de 1,2 (ver figura 6 y tabla 5 y 6). El primer clúster indica que hay una mayor similitud entre el bosque maduro de Bremen, el corredor Pavas hacia Bremen y el corredor Monos, en este primer conglomerado se encuentran las observaciones más cercanas, es decir, con una distancia más próxima a cero como es el caso del bosque de Bremen con el corredor Monos hacia Barbas; por su parte, en el segundo clúster se agrupan el corredor Pavas y el corredor Colibríes hacia Barbas; continuando con el tercer clúster, en éste se agrupan la mayor cantidad de elementos como los potreros aledaños a los corredores Monos y Colibríes y el potrero aledaño al corredor Pavas hacia Bremen, en este conglomerado el subcluster formado por los potreros que colindan con el corredor Colibríes presentan una distancia muy próxima a cero, seguido por los potreros que colindan con el corredor Monos; en cuanto al cuarto clúster, éste se encuentra compuesto por un único elemento, que corresponde al potrero que limita con el corredor Pavas hacia Bremen y finalmente, el quinto clúster agrupa el bosque maduro de Barbas y el corredor Colibríes hacia Bremen.

En cuanto a los niveles de materia orgánica en las muestras de los dos años en estudio (ver figura 4 y 5), se observa en los datos de 2005 niveles altos en las zonas restauradas y medios en los potreros y en el 2012 se observan niveles altos en el bosque maduro, medio-alto en las zonas restauradas y el 50% de los potreros con niveles medio-bajo y el 50% con niveles altos. Al observar la variación de la materia orgánica en los últimos 7 años para las zonas restauradas,

se observa una tendencia decreciente; esto puede deberse a varios factores como diferencias en el método de muestreo y que el muestreo no se realizó exactamente en los mismos puntos, dado que no se contaba con las coordenadas del año 2005, aunque esto se disminuye haciendo la mezcla de diferentes puntos en una muestra compuesta, esto tiene una gran incidencia en los resultados, ya que como se comentó anteriormente, el contenido de materia orgánica depende de varios factores naturales, como la topografía.

En cuanto al porcentaje de materia orgánica hallado en los potreros, los niveles más bajos se encuentran en los potreros aledaños al corredor Pavas, el cual en el momento de tomar la muestra se encontró ganado en la zona. Este corredor se estableció en un sector de carretera, lo que conlleva a que el suelo de las zonas aledañas que no han sido restauradas presenten gran compactación. El corredor Pavas exhibe uno de los niveles más bajos de materia orgánica (8,43%) (ver tabla 1 y figura 4) lo que puede deberse al retraso en la ejecución de las fases de restauración propuestas para 2008 y 2009. Se tienen reportes del ingreso de ganado a la zona restaurada por la falta de estacones vivos, que debían instalarse en la fase inicial del proyecto, trayendo como consecuencia pérdida de la materia orgánica (Vargas W. , 2010). Al momento de tomar las muestras en algunos potreros que se encontraban abandonados, éstos presentaban cobertura vegetal abundante, por lo que en el análisis de laboratorio arrojaron niveles altos de materia orgánica. Como se explicó en apartados anteriores, en los procesos naturales de sucesión luego del abandono de un cultivo o de la actividad ganadera, se empiezan a restablecer los ciclos de nutrientes con ayuda de los microorganismos y los residuos vegetales, que incrementan los niveles de materia orgánica en el suelo.

Al analizar el corredor Colibríes hacia Bremen se observa su gran similitud con el bosque maduro (ver figura 6), éste además presenta el mayor contenido de materia orgánica de las zonas restauradas en estudio. Esto se debe en parte al manejo que se le dio a las coberturas de pasto estrella (*Cynodon plectostachyus*), a través de especies controladoras de pasturas capaces de invadir rápidamente y generar las condiciones favorables para la germinación de semillas (Vargas W. , 2010). Esta especie de pasto se caracteriza por producir gran cantidad de biomasa, su dinámica de crecimiento incluye la rápida elongación de estolones, producción y senescencia de hojas, de manera que tres o cuatro semanas después del corte o pastoreo el material vegetal que no ha sido consumido empieza a acumularse en forma de materia orgánica (López González, et al., 2010). Asimismo otras especies del género *Cynodon* como *Cynodon dactylon* se han encontrado fuertemente correlacionadas de forma positiva con elementos del suelo como materia orgánica, arcilla, conductividad etc. (Galiano, 1985). Contrario a lo encontrado en el corredor Colibríes hacia Bremen, el mismo corredor hacia Barbas presenta el segundo nivel más bajo de materia orgánica en zonas restauradas, después del corredor Colibríes (ver tabla 1 y figura 4), este resultado puede deberse al impacto negativo del ganado en la zona restaurada, que al

ingresar al corredor por daños en la cerca, han destruido árboles y parte del sotobosque (Vargas W. , 2010).

De acuerdo a estos resultados se puede concluir en general que las zonas restauradas se asemejan más al bosque maduro que a los potreros, con lo que se cumple uno de los objetivos que tiene la estrategia implementada en los corredores de Filandia basada en la aceleración de procesos sucesionales, es necesario tener en cuenta que en este trabajo se están analizando únicamente las propiedades fisicoquímicas del suelo y específicamente los niveles de materia orgánica, por lo que para definir con mayor certeza el éxito de la restauración es necesario realizar estudios que incluyan otros indicadores tanto bióticos como abióticos.

8. CONCLUSIONES

La restauración ecológica tiene como objetivo ayudar a restablecer la composición, estructura y dinámicas del ecosistema que ha sido degradado, utilizando como modelo un ecosistema de referencia. En la mayoría de estudios se utilizan indicadores biológicos como la diversidad de especies para evaluar el éxito de la restauración. Este trabajo de grado busca destacar la importancia de realizar un análisis preliminar del suelo que permita evaluar las características fisicoquímicas y biológicas del suelo, y así determinar que tan lejos se encuentran éstas del ecosistema de referencia y de esta forma poder establecer las medidas y estrategias adecuadas para efectuar una restauración exitosa y en el menor tiempo posible.

Dentro de las variables analizadas, la materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico muestran cambios sucesionales a corto plazo, pudiéndose utilizar como indicadores de restauración; por otra parte, variables como la concentración de elementos mayores y menores y la textura del suelo, dependen de factores como el material parental y por lo tanto no exhiben cambios sucesionales significativos en el corto plazo.

Se encontraron correlaciones positivas y negativas entre la materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico, y entre la materia orgánica y el pH respectivamente, acorde a lo reportado por la literatura. Adicionalmente, existe una relación sucesional entre los porcentajes de nitrógeno y carbono del suelo en los tres elementos del paisaje estudiados, de manera que los niveles más bajos se encuentran en zonas perturbadas, niveles medios en las zonas restauradas y niveles altos en las zonas no alteradas como los bosques maduros.

Se destaca la importancia de la materia orgánica como factor clave en el proceso de restauración, debido a su rol en el almacenamiento de agua, retención de nutrientes en forma disponible para las plantas y su función potenciadora de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Adicionalmente, la materia orgánica y su interacción con los microorganismos, genera las condiciones necesarias para que se produzcan los estados sucesionales requeridos para llegar al ecosistema de referencia, produciendo cambios en las propiedades del suelo que permiten el establecimiento o inhibición de ciertas especies de plantas a lo largo del tiempo.

9. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar estudios similares utilizando la actividad microbiana del suelo como indicador en el proceso de restauración ecológica y comparar con los resultados obtenidos en el presente trabajo. Los microorganismos del suelo juegan un rol importante en procesos como la descomposición de la materia orgánica, reciclaje de nutrientes en los suelos, promoción del crecimiento de las plantas mediante secreción de hormonas que actúan en la fijación de nitrógeno, degradación de contaminantes, entre otros; algunos de ellos tienen la capacidad de producir capas de polisacáridos y glicoproteínas que cubren la superficie celular o formar capsulas gelatinosas o de limo con las cuales pueden adherirse a diversas estructuras, estas sustancias secretadas ayudan a la cementación de las partículas del suelo en microagregados estables que mejoran la estructura del suelo (Dash & Dash, 2009; Hoorman, 2011).

Una de las características más importantes en las comunidades de microorganismos, para realizar este tipo de estudios, es que presentan cambios a medida que ocurre la sucesión natural. Luego de una perturbación y cambio en el uso del suelo (agricultura, ganadería etc.) la comunidad microbiana del suelo y su actividad varían significativamente (Hoorman, 2011). El proceso de sucesión se observa tanto en la comunidad de plantas como en el suelo, y en especial, las bacterias que habitan la rizosfera tienen la habilidad de modificar el ambiente del suelo y favorecer ciertas comunidades de plantas; en las etapas tempranas de sucesión cuando comienzan a establecerse las especies pioneras, se empiezan a formar tipos diferentes de materia orgánica, que cambian el tipo de nutrientes disponibles para las bacterias, y a su vez, en este proceso cíclico, las comunidades bacterianas cambian la estructura y ambiente del suelo para que otras plantas puedan establecerse (Hamer, 2010; Hoorman, 2011).

Se recomienda también analizar la relación C/N para los microorganismos del suelo, esta relación oscila entre 8:1 y 12:1 y representa una herramienta útil para evaluar la limitación de nutrientes en un ecosistema (Cleveland & Liptzin, 2007).

10. BIBLIOGRAFÍA

Alcaldía Municipal de Filandia. (s.f.). *Sitio oficial de Filandia en Quindío, Colombia*. Recuperado el 01 de Septiembre de 2012, de Sitio oficial de Filandia en Quindío, Colombia: http://filandia-quindio.gov.co/apc-aa-files/34373838333435393431666366353030/ASPECTOS_METEOROLOGICOS.pdf

Alcaldía Municipal Filandia Quindío . (25 de Noviembre de 2011). *Sitio oficial de Filandia en Quindío, Colombia*. Recuperado el 01 de Septiembre de 2012, de Sitio oficial de Filandia en Quindío, Colombia: <http://www.filandia-quindio.gov.co/sitio.shtml?apc=mTxx-1-&m=f>

Arias, A. C. (2001). *Suelos Tropicales*. San José: Editorial Universidad Estatal a Distancia .

Astaraei, A. R. (2008). Microbial Count and Succession, Soil Chemical Properties as Affected by Organic Debrises Decomposition. *Am-Euras.J.Agric & Environ. Sci* , 178-188.

Bedoya, J. J. (2007). Valoración Inicial del Potencial de Conectividad de Corredores Biológicos por Medio de Mamíferos Terrestres Medianos y Grandes en un Bosque Subandino. *Trabajo de Grado* . Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana .

Bennett, G., & Mulongoy, K. J. (2006). Review of Experience with Ecological Networks, Corridors and Buffer Zones. *Secretariat of the Convention on Biological Diversity* , 23, 100.

Bernal Alvarez, R. F. (1986). *Estudio de Zonificación y Uso Potencial del Suelo en la Zona Cafetera del Departamento del Quindío* . Bogotá : Federación Nacional de Cafeteros de Colombia.

Bot, A., & Benites, J. (2005). *The Importance of Soil Organic Matter Key to Drought- Resistant Soil and Sustained Food and Production*. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations .

Brown, R. B. (1990). *Soil Texture*. Florida: Electronic Data Information Source of UF/IFAS Extension.

Brown, T., LeMay, E., Bursten, B., & Murphy, C. (2009). *Química la Ciencia Central*. Atlacomulco: Pearson Education.

Buol, S. W. (2008). *Soils, Land, and Life*. New Jersey: Pearson Education.

Burbano, H., & Silva, F. (2010). *Ciencia del Suelo: Principios Básicos* . Bogotá: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo .

Ceccon, E., Olmsted, I., & Campo, J. (2002). Vegetación y Propiedades del Suelo en dos Bosques Tropicales Secos de Diferente Estado Regeneracional en Yucatán. *Agrociencia* , 621-631.

Cleveland, C., & Liptzin, D. (2007). C:N:P stoichiometry in soil: is there a “Redfield ratio” for the microbial biomass? *Biogeochemistry* , 235-252.

Covington, W. (1981). Changes in Forest Floor Organic Matter and Nutrient Content Following Clear Cutting in Northern Hardwoods. *Ecology* , 41-48.

Cuesta, P., Mateus, H., Barros, J., Contreras, A., Jimenez, N., Villaneda, E., et al. (2005). *Producción y utilización de recursos forrajeros en sistemas de producción bovina de las regiones caribe y valles interandinos*. Bogotá: Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria CORPOICA.

Dash, M. C., & Dash, S. P. (2009). *Fundamentals of Ecology*. New Delhi: Mc Graw Hill.

Diaz, P., Alvarado, P., Roveda, G., Mendivelso, D., & Useche, L. (2004). *Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Quindío*. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

Doran, J. W., & Zeiss, M. R. (2000). Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology* , 3-11.

Falk, D., Palmer, M., & Zedler, J. (2006). *Foundations of Restoration Ecology*. Washington: Island Press.

Galiano, E. (1985). The small-scale pattern of *Cynodon dactylon* in Mediterranean pastures. *Vegetatio* , 121-127.

Gilliam, F., & Adams, M. B. (1995). Plant and soil nutrients in young versus mature central appalachian hardwood stands. *10th Central Hardwood Forest Conference* (págs. 109-118). United States Department of Agriculture USDA.

Greipsson, S. (2011). *Restoration Ecology*. Ontario : Jones & Bartlett Learning.

Guariguata, M. R., & Ostertag, R. (2000). Neotropical Secondary Forest Succession: Changes in Structural and Functional Characteristics. *Forest Ecology and Management* , 185-206.

Haddad, N. M., & Baum, K. A. (1999). An Experimental Test of Corridor Effects on Butterfly Densities. *Ecological Applications* , 623-633.

Hamer, U. (2010). World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World. *Response of soil microorganisms to land-use change in China, Ecuador and Germany*, (págs. 87-90). Brisbane.

Hazelton, P., & Murphy, B. (2007). *Interpreting Soil Test Results: What Do All The Numbers Mean?* Collingwood: CSIRO Publishing.

Hernandez, H., Hoyos, C. A., & Hoyos, R. A. (2011). *Manual de Manejo y Uso del Suelo en Zona de Ladera*. Cali: Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC).

Hilty, J. A., Lidicker, W. Z., & Merendeler, A. M. (2006). *Corridor Ecology, the Science and Practice of Linking Landscapes for Biodiversity Conservation*. Washington: Island Press.

Holl, K. (1999). Factors Limiting Tropical Rain Forest Regeneration in Abandoned Pasture: Seed Rain, Seed Germination, Microclimate, and Soil. *Biotropica* , 229-242.

Hoorman, J. (2011). *The Role of Soil Bacteria*. Ohio: The Ohio State University.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2010). *El ABC de los suelos para no expertos* . Bogotá : Imprenta Nacional de Colombia.

Jia, G.-m., Cao, J., Wang, C., & Wang, G. (2005). Microbial biomass and nutrients in soil at the different stages of secondary forest succession in Ziwulin, northwest China. *Forest Ecology and Management* , 117-125.

Kimmins, J. P. (1987). *Forest Ecology*. New York: Prentice Hall.

Krebs, C. (2009). *Ecology*. San Francisco: Pearson.

López González, F., Estrada Flores, J., Avilés Nova, F., Yong Ángel, G., Hernández Morales, P., Martínez Loperena, R., et al. (2010). Agronomic evaluation and chemical composition of African Star Grass (*Cynodon plectostachyus*) in the southern region of the state of Mexico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* , 151-159.

Lozano, F. H. (2009). *Herramientas de Manejo para la Conservación de Biodiversidad en Paisajes Rurales*. Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos "Alexander von Humboldt" y Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR).

Lozano, F. H., Vargas, A. M., Vargas, W. G., Jimenez, E., Mendoza, J. E., Caycedo, P., et al. (2006). *Modelo de Manejo Sostenible de Paisajes Rurales para*

la Conservación de la Biodiversidad en la Región Andina Colombiana. Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos "Alexander Von Humboldt".

Martinez Romero, E. (1996). La Restauración Ecológica. *Ciencias* , 56-61.

McCauley, A., Jones, C., & Jacobsen, J. (Mayo de 2009). *Nutrient Management: a Self-Study Course from MSU Extension Continuing Education Series* . Recuperado el 7 de Agosto de 2012, de <http://landresources.montana.edu/NM/Modules/Module8.pdf>

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Putumayo (Colombia) Programa Nacional de Transferencia de Tecnología Agropecuaria. (2002). *Capacitación en obtención de nuevos productos derivados de la caña y el manejo adecuado de la agroindustria panelera, municipio de Mocoa*. Mocoa: Ministerio de Agricultura y Desarrollo rural- MADR.

Nadporozhskaya, M. A., Mohren, G. M., Chertov, O. G., Komarov, A. S., & Mikhailov, A. V. (2006). Dynamics of Soil Organic Matter in Primary and Secondary Forest Succession on Sandy Soils in The Netherlands: An Application of the ROMUL Model. *Ecological Modelling* , 399-418.

Núñez, J. (1996). *Manual de Laboratorio de Edafología*. San José: Editorial Universidad Estatal a Distancia (EUNED).

O'Neill, K., Amacher, M., & Perry, C. (2005). *Soils as an indicator of forest health: a guide to the collection, analysis, and interpretation of soil indicator data in the Forest Inventory and Analysis program*. St Paul: Department of Agriculture, Forest Service, North Central Research Station.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO). (17 de Noviembre de 2006). *Textura del Suelo*. Recuperado el 15 de Septiembre de 2012, de ftp://ftp.fao.org/fi/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s06.htm

Osorio, N. W. (25 de Septiembre de 2006). *Muestreo de suelos*. Recuperado el 1 de Agosto de 2012, de Universidad Nacional de Colombia, Escuela de Geociencias : <http://www.unalmed.edu.co/~esgeocien/documentos/muestreo.pdf>

Primack, R. B. (2010). *Essentials of Conservation Biology*. Massachusetts: Sinauer Associates .

Proyecto U.T.P - GTZ. (2001). *Suelos del Eje Cafetero*. Pereira: Proyecto U.T.P - GTZ.

- Raven, P., Evert, R., & Eichhorn, S. (2005). *Biology of Plants*. New York: W.H. Freeman and Company Publishers.
- Rees, R. M., Ball, B. C., Campbell, C. D., & Watson, C. A. (2001). *Management of Soil Organic Matter*. Londres: CAB International.
- Rosen, C., Bierman, P., & Eliason, R. (2008). *Soil Test Interpretations and Fertilizer Management for Lawns, Turf, Gardens, and Landscape Plants*. Minnesota: University of Minnesota .
- Sanchez, S., Crespo, G., Hernandez, M., & García, Y. (2008). Acumulación y descomposición de la hojarasca en un pastizal de *Panicum maximum* y en un sistema silvopastoril asociado con *Leucaena leucocephala*. *Zootecnia Tropical* , 269-273.
- Society for Ecological Restoration (SER) International, Grupo de Trabajo sobre Ciencia y Políticas. (2004). *Principios de SER internacional Sobre la Restauración Ecológica* . Washington.
- Sparks, D. L. (2003). *Environmental Soil Chemistry*. San Diego : Academic Press.
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2010). *Plant Physiology*. Sinauer Associates Inc.
- United States Department of Agriculture (USDA). (Septiembre de 2009). *Soil Quality Indicators*. Recuperado el 15 de Septiembre de 2012, de http://soils.usda.gov/sqi/assessment/files/indicator_sheet_guide_sheet.pdf
- USDA Natural Resources Conservation Service. (Abril de 2011). *Soil Quality Indicators*. Recuperado el 15 de Septiembre de 2012, de http://soils.usda.gov/sqi/assessment/files/pH_sq_chemical_indicator_sheet.pdf
- USDA Natural Resources Conservation Service. (Enero de 1998). *Soil Quality Indicators: pH*. Recuperado el 15 de Septiembre de 2012, de http://urbanext.illinois.edu/soil/sq_info/ph.pdf
- USDA Natural Resources Conservation Service. (Octubre de 2009). *Soil Quality Indicators: Total Organic Carbon*. Recuperado el 10 de Septiembre de 2012, de *Soil Quality Indicators: Total Organic Carbon*: http://soils.usda.gov/sqi/assessment/files/toc_sq_biological_indicator_sheet.pdf
- Valverde Valdés, T., Meave del Castillo, J., Carabias Lillo, J., & Cano Santana, Z. (2005). *Ecología y Medio Ambiente*. México D.F: Pearson Educación .
- Vargas, W. (2010). *Consideraciones sobre el estado actual de los corredores de conexión en el sector Barbas – Bremen y el establecimiento de pasos elevados*

para fauna. Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

Vargas, W. G. (2008). *Evaluación de dos estrategias de restauración en el establecimiento del corredor Barbas-Bremen, Quindío, Colombia*. Cali: Universidad del Valle, Programa de Maestría en Ciencias Biológicas .

Walker, R., & Craighead, L. (1997). Analyzing Wildlife Movement Corridors in Montana Using GIS. *ESRI User Conference Proceedings*. California.

Zak, D., Grigal, D., Gleeson, S., & Tilman, D. (1990). Carbon and Nitrogen Cycling during Old-Field Sucession: Constraints on Plant and Microbial Biomass. *Biogeochemistry* , 111-129.

ANEXOS

Anexo 1. Presupuesto del proyecto

Presupuesto			
	Costo Unitario	Cantidad	Total
<u>Costos Operacionales</u>			
Alojamiento	\$ 30.000,00	3	\$ 90.000,00
Alimentación	\$ 15.000,00	3	\$ 45.000,00
Transporte	\$ 50.000,00	1	\$ 50.000,00
Transporte interno			\$ 25.000,00
GPS	\$ 1.000.000,00	1	\$ 1.000.000,00
Otros materiales			\$ 200.000,00
Computador	\$ 1.000.000,00	1	\$ 1.000.000,00
Papelería			\$ 500.000,00
Análisis de muestras (CIAT)	\$ 120.000,00	14	\$ 1.680.000,00
Subtotal Costos Operacionales			\$ 4.590.000,00
<u>Costos Administrativos</u>			
Auxiliar de campo	\$ 25.000,00	4	\$ 100.000,00
Subtotal Costos Administrativos			\$ 100.000,00
Costo Total			\$ 4.690.000,00

Anexo 2. Cronograma

Actividad	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Revisión bibliográfica	X	X				
Muestreo en campo		X				
Análisis de datos		X	X			
Elaboración del informe			X	X	X	
Sustentación						X

Anexo 3. Matriz de marco lógico

Objetivo General			
Determinar la efectividad de las estrategias de restauración implementadas en el corredor Barbas - Bremen, a partir de la caracterización fisicoquímica del suelo			
	Actividades	Supuestos	Indicador
Objetivo específico 1: Determinar las características fisicoquímicas del suelo (pH, materia orgánica, nutrientes y textura) en los diferentes puntos de muestreo y asociar los resultados con el desarrollo actual de los corredores	<ul style="list-style-type: none"> -Establecimiento de los elementos del paisaje a muestrear -Establecimiento de los puntos de muestreo en los diferentes elementos del paisaje -Definir el método de muestreo adecuado para la recolección de muestras de suelo -Especificar los materiales necesarios para realizar la recolección de muestras -Definir el laboratorio de análisis de suelos donde se enviarán las muestras para su caracterización fisicoquímica 	<ul style="list-style-type: none"> - Utilización de la metodología correcta, que permita la recolección de datos de calidad. -Condiciones climatológicas adecuadas para realizar la recolección de muestras de suelo 	- Resultados del análisis de suelos
Objetivo específico 2: Comparar la composición del suelo en los diferentes puntos de muestreo	<ul style="list-style-type: none"> -Definir el programa estadístico con que se analizarán los datos obtenidos en el laboratorio -Establecer las variables más significativas para realizar el análisis estadístico 	<ul style="list-style-type: none"> -Obtener los resultados del análisis de suelo a tiempo -Existen variaciones en las propiedades del suelo para los diferentes elementos del paisaje 	-Análisis de clúster que agrupe los datos obtenidos en el análisis de suelo
Objetivo específico 3: Comparar la composición del suelo con la caracterización realizada en años anteriores	<ul style="list-style-type: none"> -Definir el programa estadístico con que se analizarán los datos obtenidos en el laboratorio -Establecer las variables más significativas para realizar el análisis estadístico 	<ul style="list-style-type: none"> -Disponibilidad de información del análisis de suelo realizado en años anteriores -Se han producido cambios a lo largo del tiempo y existen variaciones en las propiedades fisicoquímicas del suelo 	-Análisis gráfico que permita visualizar diferencias en los dos años en estudio

Anexo 4. Elementos esenciales obtenidos del suelo

Elemento	Función
<u>Micronutrientes</u>	
Molibdeno (Mo)	Fijación de N y reducción de nitrato, es un constituyente de la nitrogenasa, nitrato reductasa y xantina deshidrogenasa.
Níquel (Ni)	Metabolismo del N, constituyente de ureasas e hidrogenasas.
Cobre (Cu)	Activador o componente de algunas enzimas como la tirosinasa, citocromo oxidasa, entre otras.
Zinc (Zn)	Activador o componente de enzimas como la alcoholdehidrogenasa, la anhidrasa carbónica etc.
Manganeso (Mn)	Involucrado con enzimas activadas con cationes, la liberación de oxígeno en la fotosíntesis y la integridad de la membrana del cloroplasto.
Boro (B)	Involucrado en la elongación celular, el metabolismo de ácidos nucleicos e influencia la utilización del calcio.
Hierro (Fe)	Requerido para la síntesis de clorofila, es componente de citocromos y nitrogenasas .
Cloro (Cl)	Requerido para procesos de ósmosis y balance iónico.
<u>Macronutrientes</u>	
Azufre (S)	Componente de aminoácidos (p.e cisteína, metionina), proteínas y coenzima A.
Fósforo (P)	Componente de compuestos energéticos como el ATP y ADP, ácidos nucleicos, nucleótidos, coenzimas y fosfolípidos.
Magnesio (Mg)	Constituyente de la clorofila, activador de algunas enzimas involucradas en la transferencia de fosfatos.
Calcio (Ca)	Actúa como segundo mensajero en la regulación metabólica, componente de la pared celular y se encuentra involucrado en la permeabilidad de la pared celular.
Potasio (K)	Es el cofactor de más de 40 enzimas, involucrado en osmosis, balance iónico y apertura y cierre de estomas; es el catión principal para establecer la turgencia celular y mantener la electroneutralidad.
Nitrógeno (N)	Constituyente de aminoácidos, proteínas, nucleótidos, ácidos nucleicos, clorofila y coenzimas.

Fuente: (Raven, Evert, & Eichhorn, 2005; Taiz & Zeiger, 2010)

Anexo 5. Puntos de muestreo

N°	Muestra	Coordenadas	Hora	Fecha
1	Bosque maduro Bremen	04° 41' 04" N, 075° 37' 34" W	03:00 p.m.	04-ago-12
2	Bosque maduro Barbas		11:00 a.m.	04-ago-12
3	Corredor Pavas (Barbas)	04° 41' 16" N, 075° 37' 29" W	08:03 a.m.	03-ago-12
4	Corredor Pavas (Bremen)	04° 41' 15" N, 075° 37' 31" W	09:22 a.m.	03-ago-12
5	Corredor Monos (Barbas)	04° 40' 59" N, 075° 38' 23" W	11:42 a.m.	02-ago-12
6	Corredor Monos (Bremen)	04° 40' 56" N, 075° 38' 21" W	09:21 a.m.	02-ago-12
7	Corredor Colibrías (Barbas)	04° 41' 21" N, 075° 36' 47" W	11:44 a.m.	03-ago-12
8	Corredor Colibrías (Bremen)	04° 41' 19" N, 075° 36' 47" W	10:42 a.m.	03-ago-12
9	Potrero Corredor Pavas (Barbas)	04° 41' 16" N, 075° 37' 29" W	08:39 a.m.	03-ago-12
10	Potrero Corredor Pavas (Bremen)	04° 41' 18" N, 075° 37' 50" W	10:01 a.m.	03-ago-12
11	Potrero Corredor Monos (Barbas)	04° 40' 58" N, 075° 38' 23" W	11:00 a.m.	02-ago-12
12	Potrero Corredor Monos (Bremen)	04° 40' 58" N, 075° 38' 20" W	04:32 p.m.	03-ago-12
13	Potrero Corredor Colibrías (Barbas)	04° 41' 22" N, 075° 36' 42" W	12:04 p.m.	03-ago-12
14	Potrero Corredor Colibrías (Bremen)	04° 41' 18" N, 075° 36' 49" W	11:07 a.m.	03-ago-12

Anexo 6. Métodos utilizados en el laboratorio del CIAT para determinar las características fisicoquímicas de las muestras de suelo.

Características fisicoquímicas	Método de determinación*
pH (Un)	pH Agua 1:1
Al (cmol/kg)	Aluminio Cambiable (KCl 1M) Vol.
MO (g/kg)	Materia Orgánica Walkley-Black Espectrometría
P-BrayII (mg/kg)	Fósforo Bray II Espectrometría
Ca (cmol/kg)	Calcio Intercambiable (Ab.At.)
Mg (cmol/kg)	Magnesio Intercambiable Ab. At.
K (cmol/kg)	Potasio Intercambiable Ab. At.
Na (cmol/kg)	Sodio Intercambiable Ab. At.
CIC (cmol/kg)	Capacidad Int. Catiónico (Amonio Acetato) Volumet.
B (mg/kg)	Boro en Agua Caliente (Espectrometría. Azometina)
S (mg/kg)	Azufre Extractable (Fosfato Ca) Turbidimetría
Cu (mg/kg)	Cobre Extract. Doble Ácido Ab.At.
Fe (mg/kg)	Hierro Extract. Doble Ácido Ab.At.
Mn (mg/kg)	Manganeso Extract. doble Ácido Ab.At.
Zn (mg/kg)	Zinc Extract. en Doble Ácido Ab.At.
Arena (%)	Arena (Bouyucos)
Limo (%)	Limo (Bouyucos)
Arcilla (%)	Arcilla (Bouyucos)
Textura	Textura (Bouyucos)

Fuente: CIAT

Anexo 7: Clasificación de pH

pH	Clasificación
3,5 - 4,4	Extremadamente ácido
4,5 - 5,0	Muy fuertemente ácido
5,1 - 5,5	Fuertemente ácido
5,6 - 6,0	Moderadamente ácido
6,1 - 6,5	Ligeramente ácido
6,6 - 7,3	Neutro
7,4 - 7,8	Ligeramente alcalino
7,9 - 8,4	Moderadamente alcalino
> 8,4	Fuertemente alcalino

Fuente: (USDA Natural Resources Conservation Service, 1998)

Anexo 8: Niveles de materia orgánica (%)

	Bajo	Medio	Alto
Frio	Menor de 5	5 - 10	Mayor de 10
Templado	Menor de 3	3 - 5	Mayor de 5
Calido	Menor de 2	2 - 3	Mayor de 3

Fuente: (Cuesta, et al., 2005)

Anexo 9: Niveles de micronutrientes y fósforo (mg/kg)

Elemento	Bajo	Medio	Alto
Fósforo (P)	Menor de 20	20 – 40	Mayor de 40
Boro (B)	Menor de 0,2	0,2 – 0,4	Mayor de 0,4
Hierro (Fe)	Menor de 25	25 – 50	Mayor de 50
Cobre (Cu)	Menor de 2	2 – 3	Mayor de 3
Manganeso (Mn)	Menor de 5	5 – 10	Mayor de 10
Zinc (Zn)	Menor de 1,5	1,5 – 3	Mayor de 3
Azufre (S)	Menor de 10	10 – 20	Mayor de 20

Fuente: (Cuesta, et al., 2005)

Anexo 10: Niveles de macroelementos (cmol/kg)

Elemento	Bajo	Medio	Alto
Calcio (Ca)	Menor de 3	3 – 6	Mayor de 6
Magnesio (Mg)	Menor de 1,5	1,5 – 2,5	Mayor de 2,5
Potasio (K)	Menor de 0,2	0,2 – 0,4	Mayor de 0,4

Fuente: (Cuesta, et al., 2005)

Anexo 11: Niveles de capacidad de intercambio catiónico (cmol/kg)

CIC	
Nivel	cmol/kg
Muy bajo	Menor de 6
Bajo	6 – 12
Medio	12 – 25
Alto	25 – 40
Muy alto	Mayor a 40

Fuente: (Hazelton & Murphy, 2007)

Anexo 12: Proporciones óptimas de la CIC para los cationes

Catión	% CIC
Calcio	65 - 80
Magnesio	10 – 15
Potasio	1 – 5
Sodio	0 - 1
Aluminio	Menor a 5

Fuente: (Hazelton & Murphy, 2007)

Anexo 13. Relación Ca/Mg

Descripción	Ca/Mg
Ca deficiente	Menor a 1
Ca bajo	1 – 4
Balanceado	4 – 6
Mg Bajo	6 – 10
Mg deficiente	Mayor a 10

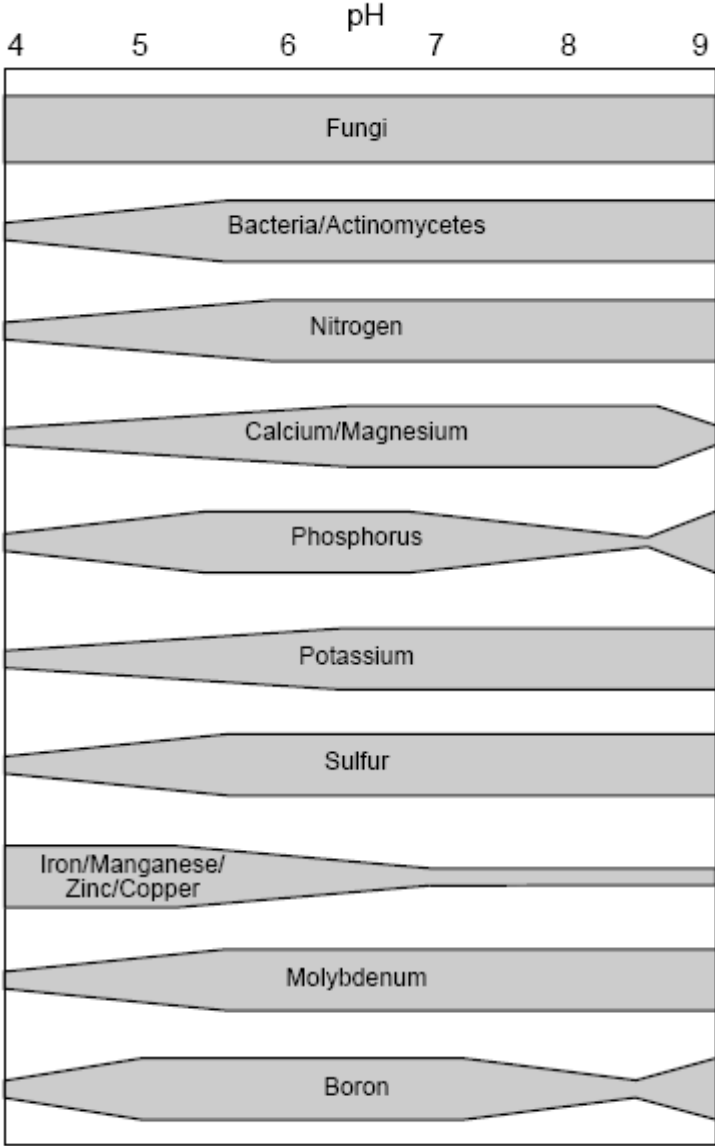
Fuente: (Hazelton & Murphy, 2007)

Anexo 14. Clasificación de los suelos en Filandia (Quindío)



Fuente: IGAC

Anexo 15: Efectos del pH en la disponibilidad de nutrientes y actividad de microorganismos



Fuente: (Rosen, Bierman, & Eliason, 2008)