

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**

**ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL**



**NIVELES DE NITRÓGENO FIJADO POR *Inga* sp. Y VALOR DE pH  
SEGÚN LA GRADIENTE, EN PARCELAS AGROFORESTALES EN  
CHIRINOS – SAN IGNACIO**

**TESIS**

**PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO FORESTAL**

**PRESENTADO POR EL BACHILLER**

**OLMER NOÉ PEÑA CONTRERAS**

**ASESORES**

**Ing. M. Sc. VITOLY BECERRA MONTALVO**

**Ing. M. Cs. JORGE ANTONIO DELGADO SOTO**

**JAÉN – PERÚ**

**2022**



### ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En la ciudad de Jaén, a los **catorce** días del mes de **diciembre** del año dos mil veintidós, se reunieron en el **Ambiente de la Sala de Docentes de Ingeniería Forestal-Filial Jaén**, los miembros del Jurado designados por el Consejo de Facultad de Ciencias Agrarias, según Resolución de Consejo de Facultad N°215-2022-FCA-UNC, de fecha 19 de julio del 2022, y con la Resolución de Consejo de Facultad N°325- 2022-FCA-UNC, de fecha 25 de octubre 2022, presentado a los Asesores; con el objetivo de evaluar la sustentación del trabajo de Tesis titulado: **"NIVELES DE NITRÓGENO FIJADO POR *Inga* sp. Y VALOR DE pH SEGÚN LA GRADIENTE, EN PARCELAS AGROFORESTALES EN CHIRINOS – SAN IGNACIO"**, ejecutado por el Bachiller en Ciencias Forestales, **Don OLMER NOÉ PEÑA CONTRERAS**, para optar el Título Profesional de **INGENIERO FORESTAL**.

A las **dieciséis** horas y **quince** minutos, de acuerdo a lo estipulado en el Reglamento respectivo, el Presidente del Jurado dio por iniciado el evento, invitando al sustentante a exponer su trabajo de Tesis y, luego de concluida la exposición, el jurado procedió a la formulación de preguntas. Concluido el acto de sustentación, el Jurado procedió a deliberar, para asignarle la calificación. Acto seguido, el Presidente del Jurado anunció la **APROBACIÓN** por **UNANIMIDAD** con el calificativo de **catorce (14)**; por tanto, el Bachiller queda expedito para el inicio de los trámites, para que se le otorgue el Título Profesional de Ingeniero Forestal.

A las **diecisiete** horas y cincuenta minutos del mismo día, el Presidente del Jurado dio por concluido el acto.

Jaén, 14 de diciembre de 2022.

  
Ing. M. Sc. Segundo Tafur Santillán  
PRESIDENTE

  
Ing. M. Cs. Leiver Flores Flores  
SECRETARIO

  
Ing. M. Sc. Germán Pérez Hurtado  
VOCAL

  
Ing. M. Sc. Vitoly Becerra Montalvo  
ASESOR

  
Ing. M. Cs. Jorge Antonio Delgado Soto  
ASESOR

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a Dios Padre Omnipotente, por permitirme tener vida, salud y sobre todo brindare los conocimientos para poder lograr uno de mis propósitos. Darle las gracias infinitas y mi gratitud total por su gran amor y bondad.

A mi madre, ya que fue el pilar fundamental y apoyo en mi formación académica, gracias a ella soy quien soy en la actualidad.

También dedico este gran logro a mi esposa quien estuvo siempre conmigo apoyándome en cada decisión que tomara, por brindarme la fortaleza para poder continuar adelante.

A mi amado hijo Derick Raphael, por ser mi fuente de inspiración y motivación para poder continuar superándome cada día más para poder seguir luchando y forjar un futuro mejor.

## **AGRADECIMIENTOS**

Mi agradecimiento se la dirijo a quien me guía todos los días y en cada momento, a quien en momentos de desesperación me da la calma, a quien me brinda la luz, el agua y la vida, a quien me permite poder ver la luz todos los días, a quien siempre me guía por el sendero correcto, a Dios.

El agradecimiento también a mi esposa y mi hijo, por permanecer siempre a mi lado y poder contar con su apoyo moral y espiritual.

En especial mi profundo agradecimiento al Dr. Segundo Vaca Marquina, quien me orientó para realizar la presente tesis, como asesor; además, por su apoyo constante, su esfuerzo, motivación, orientación y paciencia; que han sido de fundamental ayuda para la culminación de este trabajo.

Asimismo, mi reconocimiento a mis asesores, en la persona del Ing. M. Sc. Vitoly Becerra Montalvo, y al Ing. M. Cs. Jorge Antonio Delgado Soto, quienes asumieron la gran responsabilidad de continuar como mis asesores en la presente investigación, de esta manera culminar con mi proceso de titulación.

## ÍNDICE

	Pág.
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
ÍNDICE	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
RESUMEN	
ABSTRACT	
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	10
CAPÍTULO II: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	12
2.1. Antecedentes de la investigación	12
2.2. Bases teóricas	16
2.2.1. El ciclo del nitrógeno	16
2.2.2. La Fijación del Nitrógeno	18
2.2.3. Fijación biológica de nitrógeno	18
2.2.4. Microorganismos de vida libre – bacteria	20
2.2.5. Características generales de <i>Inga edulis</i> Mart.	21
2.2.6. Cultivo del café	24
2.2.7. Aspectos generales sobre el cultivo del café	25
2.2.8. Sistemas agroforestales	26
2.2.9. Café bajo sombra en Perú	27
2.2.10. Fijación de nitrógeno por <i>Inga edulis</i>	27
2.2.11. Árboles fijadores de Nitrógeno	28
2.3. Conceptos básicos	29
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO	31
3.1. Ubicación de la investigación	31
3.2. Materiales	31
3.3. Metodología	33
3.3.1. Trabajo en campo, gabinete y laboratorio	33
3.3.2. Población y muestra	33
3.3.3. Procesamiento de la información	33
3.3.4. Análisis estadístico	33

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	34
4.1. Resultados	34
4.1.1. Georreferenciación de los árboles adultos de <i>Inga densiflora</i> Benth.	34
4.1.2. Identificación botánica de la especie	34
4.1.3. Características morfológicas de los individuos adultos de la especie	35
4.1.4. Resultados del análisis de caracterización de suelos	37
4.1.5. Nitrógeno presente en suelo en relación a la gradiente	39
4.1.6. Variación de nitrógeno en relación a la pendiente	40
4.1.7. Variación del pH en relación a la distancia y pendiente	44
4.1.8. Área de proyección de copa (APCo) en relación a la altura del árbol	49
4.1.9. Variación del Nitrógeno en relación a la cobertura (APCo)	50
4.2. Discusión	50
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	52
5.1. Conclusiones	52
5.2. Recomendaciones	53
CAPÍTULO VI: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
CAPÍTULO VII: ANEXOS	59
Anexo 1. Certificación de la identificación botánica	59
Anexo 2. Reporte de análisis de suelos - caracterización	60
Anexo 3. Tabla de interpretación de análisis de suelos	61
Anexo 4. Panel Fotográfico	62

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Localización de los árboles adultos del género <i>Inga</i> en la parcela	34
Tabla 2. Taxonomía de la especie	35
Tabla 3. Valores de medidas morfométricas de árboles adultos de <i>Inga densiflora</i> Benth.	37
Tabla 4. Metodología de análisis de caracterización de muestras de suelos	38
Tabla 5. Resultados de análisis de caracterización de suelos	39
Tabla 6. Niveles de nitrógeno y valores de pH en relación a la pendiente	40
Tabla 7. Niveles de nitrógeno (%) en relación la distancia en sentido de la pendiente	43
Tabla 8. Valor del pH en relación a la distancia y en sentido de la gradiente	47

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Proceso del Ciclo del Nitrógeno	17
Figura 2. Mapa de ubicación de la investigación	32
Figura 3. Forma de medición de altura del árbol	36
Figura 4. Medición de decímetro de la base de la copa de un árbol	36
Figura 5. Variación de nitrógeno del árbol 1 en relación a la pendiente	41
Figura 6. Variación de nitrógeno del árbol 2 en relación a la pendiente	41
Figura 7. Variación de nitrógeno del árbol 3 en relación a la pendiente	42
Figura 8. Variación de nitrógeno del árbol 4 en relación a la pendiente	43
Figura 9. Variación de pH en relación a la distancia del Árbol 1	45
Figura 10. Variación de pH en relación a la distancia del Árbol 2	45
Figura 11. Variación de pH en relación a la distancia del Árbol 3	46
Figura 12. Variación de pH en relación a la distancia del Árbol 4	47
Figura 13. Correlación de la altura total del árbol y Área de Proyección de Copa (Cobertura)	49
Figura 14. Variación de Nitrógeno en relación a la cobertura APCo	50

## RESUMEN

La cafcultura de la provincia de San Ignacio, en una importante superficie se realiza bajo la forma de sistemas agroforestales, pero aún no se conoce sobre las especies arbóreas y el rol que cumplen en relación a la sombra y la fijación biológica de nitrógeno, por ello la siguiente investigación busca determinar niveles de fijación de Nitrógeno biológico, por *Inga* sp, en plantaciones agroforestales de café en Chirinos, la metodología se basó en la evaluación de la concentración de los niveles de nitrógeno y de los valores de pH, en relación a la distancia en el sentido de la pendiente, los resultados obtenidos fueron, una de las especies que se utilizan en este sistema es la *Inga densiflora* Benth, conocida en la zona como “guaba”, respecto a las dimensiones morfométricas se encontró que un ejemplar con altura total de 18.00 metros, dap de 28 cm, y área proyección de copa de 85.8050 m<sup>2</sup>; presenta relación directa entre altura y APCo., los resultados del análisis de caracterización, establecen que el suelo de esta parcela tienen nutrientes media escala, con niveles medio-bajos de nitrógeno (0.17 %), nivel medio de materia orgánica (3.80 %), niveles bajos de fosforo (5.02 ppm) y nivel alto de potasio (245.33 ppm), entre los principales. La concentración promedio más importante del nitrógeno ocurre a la distancia de 2.00 m, (19.00 %), seguido de la distancia de 3.00 m, (17.00 %) y la menor concentración se localiza en el primer metro de distancia respecto al árbol. Se aprecia que, el valor promedio más importante del pH, se encuentra a 1.00 y 2.00 m, de distancia, el menor valor se localiza en el tercer metro de distancia respecto al árbol.

**Palabras clave:** Fijación biológica de nitrógeno, sistemas agroforestales, género *Inga* sp., cafeto.

## ABSTRAC

Coffee growing in the province of San Ignacio, in an important area is carried out in the form of agroforestry systems, but it is not yet known about the tree species and the role they play in relation to shade and biological nitrogen fixation, therefore The following research seeks to determine levels of biological Nitrogen fixation, by *Inga* sp, in agroforestry coffee plantations in Chirinos, the methodology was based on the evaluation of the concentration of nitrogen levels and pH values, in relation to the distance in the direction of the slope, the results obtained were: one of the species used in this system is the *Inga densiflora* Benth, known in the area as "guaba", with respect to the morphometric dimensions it was found that a specimen with height total of 18.00 meters, dbh of 28 cm, and canopy projection area of 85.8050 m<sup>2</sup>; presents a direct relationship between height and APCo., the results of the characterization analysis establish that the soil of this plot has average nutritional values, with medium-low levels of nitrogen (0.17%), average level of organic matter (3.80%), levels low phosphorus (5.02 ppm) and high potassium level (245.33 ppm), among the main ones. The most important average concentration of nitrogen occurs at the distance of 2.00 m, (19.00%), followed by the distance of 3.00 m, (17.00%) and the lowest concentration is located in the first meter of distance from the tree. It can be seen that the most important average value of the pH is located at 1.00 and 2.00 m, Away, the lowest value is located in the third meter of distance from the tree.

**Keywords:** Biological nitrogen fixation, agroforestry systems, genus *Inga* sp., cafeto.

## CAPÍTULO I

### INTRODUCCIÓN

Los sistemas agroforestales son la forma de uso de la tierra, en la cual se usa técnicas de manejo de suelo, combinación de las especies forestales de uso múltiple, en cuanto a tiempo y espacio con especies agronómicas ya sea perennes o de producción animal, haciendo de este un sistema sostenible y secuencial de acuerdo a las prioridades del productor (OFN, 2013).

El cultivo del cafeto, tiene importancias gravitantes en la economía, en Jaén y San Ignacio de la región Cajamarca, donde el 80 % de la población rural se dedica al cultivo de café, con dependencia de ingresos casi en su totalidad del café, la producción viene disminuyendo por factores climáticos, el excesivo uso de agroquímicos y escasa presencia de árboles de sombra, generan bajos rendimientos también en calidad en físico como en taza.

El género *Inga* sp, es una de las especies más utilizadas, como sombra en cafetales, especie fijadora de nitrógeno por excelencia, incluye alrededor de 300 especies, las cuales están ampliamente distribuidas y son muy comunes en áreas bajas y altas de los trópicos en América. Algunas especies tienen un rango de altura de hasta 2000 m mientras que otras pueden tolerar un clima muy húmedo con 3500-5000 mm de lluvia por año o un clima estacional con temporada seca de 5-6 meses y muy poca lluvia (Pennington y Fernandes, 1998). Teniendo en cuenta que la sombra es importante, además otra ventaja que ofrece el asocio con esta especie, es la fijación de nitrógeno biológico hacia el suelo, en relación a la pendiente.

Con el presente trabajo de investigación, se plantea determinar la cantidad de nitrógeno biológico fijado por la especie *Inga* sp., en fincas agroforestales de café, que permita aportar información para mejorar las decisiones respecto al diseño de plantaciones de café asociadas a especies arbóreas.

La superficie de suelo cultivada con café, en las provincias de San Ignacio, responde a una asociación con especies forestales, entre ellas *Inga* sp., en su mayor superficie, que reportan rendimientos medios a bajos, pues también responden a un nivel de tecnología media, la variabilidad en los precios y la aceptación cada vez más importante por la producción de café local, hace que el área sembrada se incremente. La búsqueda de mejores

rendimientos, demanda mayores niveles de fertilización y una disminución de las especies de sombra, sin embargo, la apertura de mercado de cafés especiales demanda de una producción, con tecnologías que requiere la certificación, siendo una de ellas la asociación con especies forestales. Sin embargo, pocos estudios reportan los niveles de fijación de nitrógeno biológico, en las plantaciones agroforestales, por lo tanto, se plantea el presente estudio a fin de generar y aportar conocimientos a los agricultores sobre la importancia, de *Inga* sp., asociada al cultivo de cafeto.

El objetivo general para el desarrollo de la presente investigación fue, determinar niveles de fijación de Nitrógeno biológico, por *Inga* sp, en plantaciones agroforestales de café en Chirinos. Los objetivos específicos fueron los siguientes:

- ✓ Determinar los niveles de fijación biológica de nitrógeno de la especie *Inga* sp, en finca de café, en relación a la gradiente.
- ✓ Determinar los valores del pH, en relación a la gradiente, en finca de café, asociadas al *Inga* sp.
- ✓ Realizar la identificación taxonómica de la especie *Inga* sp., a nivel de especie.

## CAPÍTULO II

### REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1. Antecedentes de la investigación

El sistema de producción con semi sombra, se define en función del componente arbóreo como regulador de la luz solar. Generalmente, se emplean especies arbóreas como el guamo, el nogal o el chachafruto, entre otros y con una densidad entre 20 y 50 árboles por hectárea, o cualquier especie arbustiva semipermanente (plátano o banano) con un número de plantas entre 300 y 750 por hectárea (Arcila et al., 2010).

El sistema de producción de café con sombra, se caracteriza por el empleo de cualquier especie arbórea permanente con una densidad superior a 50 árboles por hectárea, equivalente a una distancia de siembra de 14 x 14 m. También puede darse la regulación de la luz incidente por cualquier especie arbustiva semipermanente con más de 750 sitios por hectárea, la cual puede establecerse con una distancia de siembra de 3,7 x 3,7 m, con un arreglo espacial uniforme, la regulación de la luz incidente, generalmente se emplea en aquellas regiones donde ocurre déficit hídrico y altas temperaturas. Para este sistema comúnmente se emplean plantas de valor económico, lo que se denomina sombrío productivo, como una forma de reducir los costos de producción y es una opción para diversificar el ingreso (Arcila et al., 2010).

Llanco (2014) afirma que, el efecto de la sombra y fertilización en el crecimiento de las plantas ha mostrado influencia en la tipología de manejo agronómico de café con sombra y fertilización ya que las plantas se desarrollaron con facilidad en busca de luminosidad, consecuentemente los tallos se engrosaron menos, otorgándole a estas plantas en evaluación el incremento considerable en altura de planta, en cuanto se refiere a la influencia de la sombra y fertilización en la estructura productiva de las plantas de café, mejor resultado tuvo la tipología de café sin sombra y fertilización, con el mayor número de ramas primarias y secundarias; respecto al menor número de ramas muertas o agotadas se encontraron en la tipología de café con sombra y fertilización.

Llanco (2014) menciona que, el efecto de la sombra y fertilización en la comparación de los rendimientos le brinda condiciones a la tipología de café sin sombra y fertilización, puesto que el mayor número de ramas secundarias da lugar a la formación de mayor cantidad

de flores y frutos fecundados favorecida por la luminosidad y la acción de la fertilización orgánica, habiendo obtenido un incremento de 26-28 sacos a 48-49 sacos por hectárea en promedio, que significa un incremento de 75 % adicionales respecto a la evaluación de inicio del experimento.

Con niveles de sombreado superiores al 60 % como los registrados para el nogal cafetero *Cordia alliodora*, se presenta una reducción en la producción media del 39.00 % (1,337.0 kg de café pergamino seco/ha/año), comparada con la obtenida en café a libre exposición, solar cuya producción alcanza 2,195.5 kg de café pergamino seco/ha/año, si el nivel de sombreado disminuye por debajo del 60 %, como los registrados en *Pinus oocarpa* y *Eucaliptus grandis*, la reducción en la producción de café con sombra para ambas especies solo es del 15.5 % (1,853.3 kg de café pergamino seco/ha/año); bajo sombrío, el 48 % de la cosecha se recolecta en el primer semestre del año y el 52 % en el segundo, a libre exposición la cosecha se distribuye 32 y 68 % para el primer y segundo semestre del año (Farfán - Valencia y Urrego, 2004).

Suárez et al. (2015), reportan que, la vida útil del cultivo de café es de 12 años bajo sombra y seis o siete bajos soles, la producción del grano inicia al año de ser sembrado bajo influencia de sol y a los dos años bajo sombra, con base en estas características y a las asesorías que reciben los caficultores. La mayor producción de granos por plantas, se da en la parte media de las plantas con influencia de luz solar mientras que, en las plantas sombreadas, la producción de grano se concentró en la parte basal y media.

Lara (2005) encontró que, en el cultivo de café, la sombra influyó significativamente sobre la calidad física del grano (mayor tamaño y peso, y menor % de granos imperfectos) y su composición bioquímica (cafeína, sacarosa y ácidos clorogénicos); además, mostro una correlación positiva y significativa sobre el amargo de bebida, la sombra mejoró significativamente la calidad organoléptica (cuerpo, acidez, sabor y preferencia) en altitudes entre 950–1255 m s.n.m; la fertilización influyó positivamente sobre la calidad física (mayor tamaño y peso, y menor porcentaje de granos imperfectos), composición bioquímica (materia grasa y trigonelina) y calidad organoléptica, particularmente sobre aroma, sabor y preferencia. El rendimiento de grano presentó efectos positivos y significativos sobre las variables de calidad física de grano (mayor tamaño y peso) y composición bioquímica (trigonelina, sacarosa, materia grasa y ácidos clorogénicos).

Las especies fijadoras de nitrógeno pueden producir un significativo aumento en la fertilidad del suelo, cuando están inoculadas con cepas efectivas de *Rhizobia* o *Frankia*, a través de su producción de hojarasca rica en nitrógeno y el rápido ciclo de raíces finas y de nódulos. Gran parte de las especies leguminosas arbóreas presentan elevada producción de biomasa con un significativo aporte de hojas al suelo. Además del volumen de material vegetal que aportan al suelo, las características químicas de tal material pueden condicionar la velocidad de descomposición y el ciclo de nutrientes. Los datos obtenidos muestran mayores cantidades de materia seca y de nutrientes como P, K, Mg y N para la hojarasca bajo la especie leguminosa (Días et al., 1995).

La fertilidad del suelo puede ser definida como la capacidad del suelo para suministrar a las plantas agua y nutrientes esenciales para su crecimiento y desarrollo. Los factores que determinan la fertilidad se pueden clasificar en:

- Fertilidad Físicos, que condicionan el desarrollo del sistema radicular, y su aporte hídrico. La fertilidad física se identifica por: textura, estructura, porosidad, aireación, capacidad de retención hídrica, estabilidad de agregados, etc.

- Fertilidad Químicos, que hace referencia a la reserva de nutrientes y su aporte a las plantas. Se caracteriza por: capacidad de cambio de cationes, pH, materia orgánica, macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S) y micronutrientes (B, Fe, Mo, Mn, Zn, Cu, Na y Cl), y sus formas químicas en el suelo que condicionan su biodisponibilidad.

- Fertilidad Biológicos, determinados por la actividad de los microorganismos del suelo. La microflora del suelo utiliza la materia orgánica como sustrato y fuente de energía, interviniendo en la producción de enzimas, ciclo de C y de N, transformaciones biológicas de nutrientes y procesos de humificación y mineralización (López y Miñano, 2002).

Mayz-Figueroa (2004), los microorganismos fijadores de nitrógeno de vida libre, abarcan una gama morfológica que va desde los organismos unicelulares como las bacterias y algunas cianobacterias, hasta multicelulares como las cianobacterias filamentosas y los actinomicetes, que habitan diferentes ambientes, incluyendo los extremos, todos procarióticos; comprendiendo así microorganismos pertenecientes a los Dominios *Archaea* y *Bacteria*, los cuales pueden formar asociaciones con organismos pertenecientes al Dominio *Eucaria*. Estas asociaciones pueden ser de tipo no simbiótico, ocurriendo principalmente en la filósfera o la rizósfera de algunas plantas, o de tipo simbiótico, dándose en briofitas

(musgos, hepáticas y antocerotas), helechos (*Azolla*), gimnospermas (cícadas) y angiospermas (*Gunnera*, leguminosas y *Parasponia*) y en zonas de la planta que incluyen la raíz, el tallo y las hojas.

Una característica común de los microorganismos involucrados en la FBN, es la presencia del sistema enzimático nitrogenasa, que les permite la reducción del nitrógeno molecular ( $N_2$ ) atmosférico hasta la forma asimilable  $NH_4^+$ . Esta enzima puede funcionar a cabalidad en los microorganismos viviendo en forma libre o asociados, excepto en las asociaciones de *Rizobia* con leguminosas o *Parasponia*, donde la síntesis de la enzima es compartida; es decir su acción depende de los dos organismos involucrados. La actividad es susceptible a las concentraciones de oxígeno de la atmósfera circundante, de tal manera que los organismos, bien aislados o asociados han adoptado mecanismos que le permiten la protección de la actividad de la misma, mecanismos que incluyen, protección respiratoria, conformacional y la compartimentalización.

El nitrógeno es uno de los nutrientes de mayor importancia para el cultivo del café y todas las plantas en general. Por lo tanto, es clave e indispensable comprender su ciclo, de cara a la sostenibilidad de la producción. Las únicas fuentes de nitrógeno son: la materia orgánica y el nitrógeno de la atmósfera. El nitrógeno orgánico del suelo se origina a partir de la materia orgánica y representa más del 80 % del nitrógeno total del suelo, mientras el nitrógeno inorgánico representa del 2-5 % del nitrógeno total del suelo (Arana, 2003; citado por Villareyna, 2016).

Para que las plantas puedan aprovechar el nitrógeno que proviene de la materia orgánica, es necesario que éste pase por un proceso llamado mineralización, a través del cual es transformado en nitrógeno inorgánico en forma  $NH_4^+$  (amonio). La otra forma de nitrógeno inorgánico, el nitrato ( $NO_3^-$ ), se alcanza a partir del amonio a través del proceso de nitrificación, realizado por diversos grupos de bacterias nitrificantes. El amonio y el nitrato, productos de esos procesos de mineralización y nitrificación, pueden ser aprovechados inmediatamente por las plantas (Arana Meza, 2003). Los procesos de transformación del nitrógeno están influenciados por propiedades físico-químicas del suelo, la temperatura del suelo, la humedad, pH y la calidad y cantidad de materia orgánica (Villareyna, 2016).

## 2.2. Bases teóricas

### 2.2.1. El ciclo del Nitrógeno

El Nitrógeno (N), el ladrillo que construye la vida, es un componente esencial del ADN, del ARN, y de las proteínas. Todos los organismos requieren nitrógeno para vivir y crecer. A pesar que la mayoría del aire que respiramos es N<sub>2</sub>, la mayoría del nitrógeno en la atmósfera no está al alcance para el uso de los organismos (Figura 1). La razón reside en que debido al fuerte enlace triple entre los átomos N en las moléculas de N<sub>2</sub>, el nitrógeno es relativamente inerte. En realidad, para que las plantas y los animales puedan usar nitrógeno, el gas N<sub>2</sub> tiene primero que ser convertido a una forma química disponible como el amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), el nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), o el nitrógeno orgánico (Ejemplo: urea - (NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>CO).

La naturaleza inerte del N<sub>2</sub> significa que el nitrógeno biológico disponible es, a menudo, escaso en los ecosistemas naturales. Esto limita el crecimiento de las plantas y la acumulación de biomasa. El Nitrógeno es un elemento increíblemente versátil que existe en forma inorgánica y orgánica, a la vez que en muchos y diferentes estados de oxidación. El movimiento del nitrógeno entre la atmósfera, la biosfera y la geósfera en sus diferentes formas está descrito en el ciclo del nitrógeno. Éste es uno de los ciclos biogeoquímicos más importantes. Al igual que el ciclo carbónico, el ciclo del nitrógeno consiste en varios bancos o bolsas de almacenamiento de nitrógeno y de procesos por los cuales las bolsas intercambian nitrógeno (Harrison et al., 2003; citado por Mayz-Figueroa, 2004).

Los procesos principales que componen el ciclo del nitrógeno que pasa por la biósfera, la atmósfera y la geósfera son cinco:

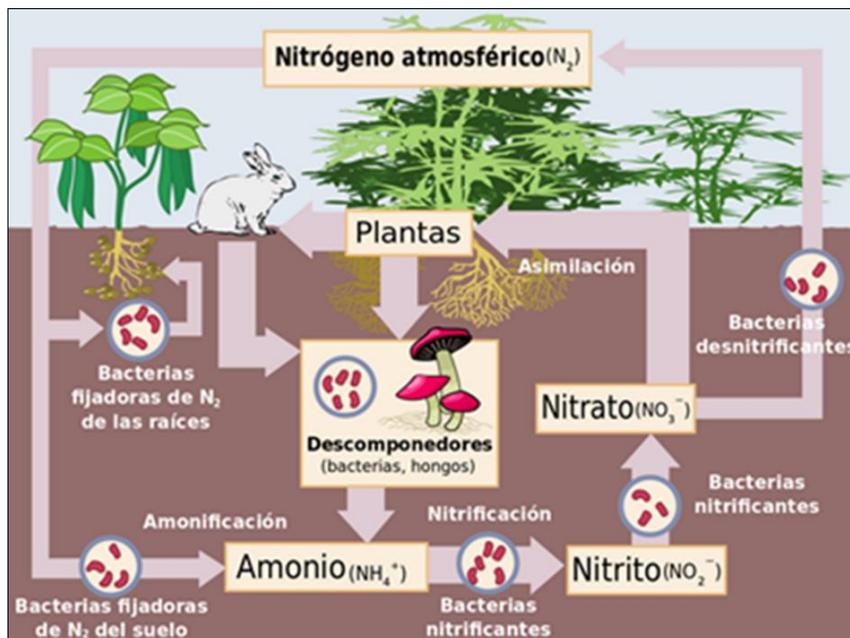
1. La fijación del nitrógeno.
2. La toma del nitrógeno (crecimiento de organismos).
3. La mineralización del nitrógeno (desintegración).
4. La nitrificación.
5. La denitrificación.

Los microorganismos, particularmente las bacterias, juegan un importante papel en todas las principales transformaciones del nitrógeno. Como procesos de mediación

microbiana, ocurren más rápidamente que los procesos geológicos, tales como los movimientos de placas, que es un proceso puramente físico. Las velocidades de las transformaciones llevadas a cabo por los microorganismos se ven afectadas por factores ambientales como la temperatura, la humedad y la disponibilidad de recursos que influyen en la actividad microbiana (Harrison et al., 2003; en Mayz-Figueroa, 2004).

**Figura 1**

*Proceso del Ciclo del Nitrógeno*



Fuente: Mayz-Figueroa (2004).

La fijación del nitrógeno es el proceso por el cual el  $N_2$  se convierte en amonio. Este proceso es esencial porque es la única manera en la que los organismos pueden obtener nitrógeno directamente de la atmósfera.  $N_2 \rightarrow NH_4^+$  Algunas bacterias, por ejemplo, las del género *Rhizobium*, son unos de los pocos organismos que fijan nitrógeno a través de procesos metabólicos. Esta simbiosis ocurre con la familia de las leguminosas. En esta relación, la bacteria que fija el nitrógeno habita los nódulos de las raíces de las legumbres y reciben carbohidratos y un ambiente favorable de su planta anfitriona a cambio de parte del nitrógeno que ellas fijan. Existen también bacterias que fijan nitrógeno sin plantas anfitrionas. Estas son conocidas como fijadores libres de nitrógeno. Es el caso de las algas azul verdosas o cianobacterias que constituyen un importante fijador de nitrógeno en ambientes acuáticos (Harrison et al., 2003; en Mayz-Figueroa, 2004).

### 2.2.2. La Fijación del Nitrógeno

Mayz-Figueroa (2004), la fijación del nitrógeno es un proceso en el cual el  $N_2$  se convierte en amonio. Éste es esencial porque es la única manera en la que los organismos pueden obtener nitrógeno directamente de la atmósfera.

Algunas bacterias, como especies del género *Rhizobium*, son los únicos organismos que fijan el nitrógeno a través de procesos metabólicos. Esta simbiosis ocurre de manera bien conocida, en la familia de las legumbres (por ejemplo, fríjoles, chícharos y tréboles). En esta relación, la bacteria que fija el nitrógeno habita los nódulos de las raíces de las legumbres y reciben carbohidratos y un ambiente favorable de su planta anfitriona a cambio de parte del nitrógeno que ellas fijan. También hay bacterias que fijan el nitrógeno que existe, sin plantas anfitrionas. Éstas son conocidas como fijadores de nitrógeno libre sin límites. En ambientes acuáticos, las algas azules verdosas (en realidad una bacteria llamada cianobacterias) es una importante fijadora de nitrógeno libre sin límites.

Además, del nitrógeno que fija la bacteria, eventos de alta energía natural, tales como los relámpagos, fuegos forestales, y hasta flujos de lava, pueden causar la fijación de pequeñas, pero significativas cantidades de nitrógeno. La alta energía de estos fenómenos naturales puede romper los enlaces triples de las moléculas de  $N_2$ , haciendo alcanzables átomos individuales de N para la transformación química. En el curso del último siglo, los humanos se han convertido en fuentes fijas de nitrógeno, tan importantes como todas las fuentes naturales de nitrógeno combinadas: quemando combustible de fósiles, usando fertilizantes nitrogenados sintéticos y cultivando legumbres que fijan nitrógeno. A través de estas actividades, los humanos han duplicado la cantidad de nitrógeno fijada que se dispersa en la biósfera cada año.

### 2.2.3. Fijación biológica de Nitrógeno

El Nitrógeno (N) es un elemento necesario en la composición de proteínas, ácidos nucleicos y otros componentes celulares, siendo así una molécula esencial para el crecimiento de todos los organismos. En la atmósfera el N ocupa aproximadamente el 80 %, existiendo en la forma  $N \equiv N$ ; sin embargo, el  $N_2$ , debido al triple enlace entre los dos átomos de nitrógeno, que hace a la molécula casi inerte, no puede ser aprovechado por la mayoría de las formas vivientes, sino sólo por un pequeño grupo de microorganismos altamente especializados, que incluyen algas, bacterias y actinomicetos. Para ser utilizado en el

crecimiento, este debe ser primero reducido y luego “fijado” (combinado) en la forma de iones amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) o nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ). El proceso a través del cual esos microorganismos reducen el nitrógeno hasta una forma utilizable es conocido como Fijación Biológica de Nitrógeno (FBN por sus siglas en español). El proceso puede ser llevado a cabo por los microorganismos en vida libre o en simbiosis con plantas, y el mismo no sólo permite usar el nitrógeno atmosférico sino también revertir o reducir la degradación del suelo (Parsons, 2004; en Mayz-Figueroa, 2004).

La FBN es mediada por el complejo nitrogenasa, presente en los organismos fijadores, el cual cataliza la conversión del  $\text{N}_2$  a  $\text{NH}_4^+$  bajo la reacción general:  $\text{N}_2 + 10\text{H}^+ + 8\text{e}^- + n\text{MgATP} \rightarrow 2\text{NH}_4^+ + \text{H}_2 + n\text{MgADP} + n\text{Pi}$  ( $n \approx 16$ ). Esta requiere de grandes cantidades de poder reductor y energía (ATP), y la reducción obligada de protones con un mínimo de 1 mol of  $\text{H}_2$  producido por mol de  $\text{N}_2$  reducido (Halbleib y Luden, 2000; citado por Mayz-Figueroa, 2004).

La actividad del complejo enzimático puede ser mermada por el oxígeno, de tal manera que, los organismos fijadores poseen mecanismos (alta tasa respiratoria) que les permiten mantener bajas concentraciones de éste a fin de mantener la enzima funcionando (Ureta y Nordlund, 2002; Lee et al., 2004, en Mayz-Figueroa, 2004).

La fijación biológica de N de las plantas leguminosas es el principal mecanismo de aporte de N en los ecosistemas naturales y es muy importante en la agricultura de poco insumo en el trópico. La fijación biológica de N puede ser considerada como una manera más efectiva, menos cara y no contaminante, para mejorar la fertilidad del suelo comparada con otras vías (como la fertilización química), las cuales presentan altos niveles de contaminación con sales nitrogenadas. En nuestro estado de conocimiento actual, la simbiosis *Rhizobium*-leguminosa es superior a los otros sistemas de fijación de N por lo que demandan un gran interés como área de futura investigación (Baca et al., 2000).

La fijación simbiótica de N se refiere al trabajo de bacterias que fijan N mientras crecen en asociación con una planta huésped. Esta asociación beneficia tanto a los microorganismos como a la planta huésped. El ejemplo más conocido es la asociación entre la bacteria *Rhizobium* y las raíces de las leguminosas (Bertsch, 1995). Estas bacterias forman nódulos en las raíces, en los cuales las bacterias fijan el N de la atmósfera y lo hacen disponible para las leguminosas. Las leguminosas entregan carbohidratos, los cuales proveen la energía

necesaria para que las bacterias fijen N. Las prácticas de manejo, como las podas, afectan la fijación de N<sub>2</sub> por los árboles de sombra leguminosos en plantaciones de café. Estas prácticas afectarán los niveles de fijación de N<sub>2</sub> y la disponibilidad de N en las plantaciones (Nygren y Ramírez, 1995), también, comparando los balances de nutrientes de asociaciones de café con árboles de sombra leguminosos y no leguminosos estimó que los árboles de *Erythrina poeppigiana* fijaron 60 kg N/ha/año.

Nygren y Ramírez (2004), Mayz-Figueroa (2004), en encontraron que los nódulos de *E. poeppigiana* desaparecieron casi completamente por diez semanas después de la poda, lo que sugiere que puede haber 20 semanas en el año durante los cuales estos árboles podados (2 veces al año) no fijan N<sub>2</sub> y compiten con el cultivo asociado por el N del suelo.

### **Organismos involucrados en la FBN**

Entre los microorganismos involucrados en la FBN, se encuentran: bacterias, algas verde-azuladas (cianobacterias) y actinomicetos, los cuales pueden fijar el nitrógeno viviendo libremente o formando asociaciones.

#### **2.2.4. Microorganismos de vida libre bacterias**

Las bacterias fijadoras de nitrógeno son componentes importantes del suelo y requieren una fuente de energía química si no son fotosintéticas, las cuales a su vez utilizan la energía de la luz solar.

Entre las bacterias de vida libre pueden encontrarse: anaeróbicas obligadas o facultativas (*Clostridium pasteurianum*, *Klebsiella* spp., *Desulfovibrio* sp.), aeróbicas obligadas (*Azotobacter* spp., *Beijerinckia* sp.) y fotosintéticas (bacterias púrpuras sulfurosas y no sulfurosas, y bacterias verdes sulfurosas) (Allan y Graham, 2002).

Las bacterias aeróbicas dependen fuertemente de las condiciones de humedad, oxígeno y materia orgánica, y las anaeróbicas son predominantes en suelos anegados donde existen las condiciones de humedad y materia orgánica, pero el suministro de oxígeno está restringido. La FBN en los suelos tropicales con las condiciones requeridas de humedad, temperatura y materia orgánica es generalmente alta.

Las bacterias aeróbicas emplean dos mecanismos de protección de la nitrogenasa: la protección respiratoria, donde se produce una elevada tasa respiratoria a expensas de un alto

consumo de carbono y energía, manteniendo así una concentración intracelular de oxígeno baja; y la protección conformacional, en la cual la nitrogenasa cambia su disposición a una forma reversible inactiva (Robson y Postgate, 1980; Segura y Espín, 1998).

### **Cianobacterias**

Las Cianobacterias tienen una amplia distribución y ocupan un gran rango de hábitats al igual que las bacterias, que incluyen suelo y agua, tanto de regiones tropicales y templadas como de climas extremos (Herrero et al., 2001). Presentan una gran diversidad morfológica, desde unicelulares hasta multicelulares filamentosas y con o sin la presencia de heterocistos. Stanier y Cohen-Bazire (1977), las describen como fotoautotróficas, fijadoras de CO<sub>2</sub> a través del Ciclo de Calvin y carentes de 2-oxoglutarato deshidrogenasa. En las cianobacterias, el amonio es incorporado en esqueletos carbonados (2-oxoglutarato) a través del ciclo de la glutamina sintetasa-glutamato sintasa para la biosíntesis de glutamato y compuestos nitrogenados derivados (Herrero et al., 2001).

#### **2.2.5. Características generales de *Inga edulis* Mart.**

##### **Clasificación taxonómica**

Según Cronquist (1981) la especie, se clasifica de la manera siguiente:

Reino	: Plantae
División	: Angiospermae
Clase	: Dicotyledoneae
Subclase	: Archychlañideae
Orden	: Rosales
Familia	: Mimosaceae
Género	: <i>Inga</i>
Especie	: <i>Inga edulis</i> Mart
Nombre común	: guaba, paca, shimbillo.

## **Descripción botánica**

Novoa (1992) señala que, *Inga edulis* Mart, es un árbol de copa densa, ancha, aparasolada con ramificación simpodial desde el segundo tercio.

El fuste es recto y cilíndrico, la corteza color marrón claro lenticelada, con lenticelas de 2 a 3 mm de largo dispuestas en hileras y aglomeradas en la base del fuste.

Las hojas son compuestas paripinnadas, de 15 a 25 cm de longitud; raquis alado con glándulas en forma de cráter entre los folíolos; con 4 a 6 pares de folíolos opuestos, oblongo-lanceolados, ápice agudo, base obtusa, haz glabro color verde oscuro, con envés pubescente y amarillento. La inflorescencia en racimos terminales de 7 a 12 cm de largo, con flores blancas hermafroditas, de 3.5 a 4 cm de largo, cáliz y corola tubulares con 4 a 5 lóbulos; estambres numerosos con filamentos filiformes de 3 a 4 cm de largo; ovario súpero. Los frutos son legumbres de 40 a 190 cm de largo, color café verduscas, profundamente estriadas, carnosas, que contienen numerosas semillas negras en su interior, rodeadas por un arilo blanquecino, algodonoso y comestible (Novoa, 1992).

## **Distribución geográfica**

CATIE (1992) menciona que, *Inga edulis* es originaria de América del Sur y se distribuye desde Brasil y Ecuador hasta Honduras. Puede encontrarse desde el nivel del mar en la costa atlántica hasta los 900 - 1 000 m s.n.m. en San Ramón y Palmares. Responde bien al desrame o poda, pues abre mucho la copa, siempre que no crezca en altura. La especie forestal es nativa de América (FAO, 1983), se desarrolla bien en bosques tropicales no inundados y con buen drenaje, aun cuando resiste las inundaciones periódicas. Se encuentra distribuida en la Amazonia, las Guyanas y el Orinoco llegando hasta el subtrópico del continente americano, pero cultivándose en toda la selva hasta los 2000 m s.n.m. Novoa (1992) señala que, la distribución geográfica del género *Inga* está restringida a los trópicos y sub trópicos americanos con cierta penetración dentro de las áreas tanto del norte y sur.

Aun cuando la mayoría de las especies tienen un rango continuo de distribución, estas han sido muy intensas en la región Orinoco Amazónico, y es allí donde se concentran gran cantidad de especies. En el Perú el género está ampliamente distribuido en toda la Amazonía, generalmente a menos de 2500 m s.n.m.

## **Importancia económica**

León citado por Chuquipoma (1990) señala que, los agricultores pre-colombinos fueron los primeros que utilizaron los árboles como sombra para el cacao. Al principio, los árboles leguminosos sólo fueron valorados por una buena sombra que suministraban, pero como producto de muchos años de observaciones, posteriormente se dieron cuenta que incrementaba los rendimientos de cacao. En las plantaciones de café la presencia de árboles del género *Inga*, permite alargar la vida de la planta, manteniendo un buen nivel de fertilidad del suelo y disminuyendo la erosión. Así mismo, CATIE (1992) manifiesta que, su uso como sombra en el cultivo del café se extendió desde el siglo pasado. De las diferentes especies reportadas, *Inga edulis* es la de mayor uso como árbol de sombra en Costa Rica. La utilización de *Inga* como frutales nativos es muy antigua y probablemente comenzó en los diferentes lugares donde consumen los frutos, como la cuenca Amazónica al sur de Brasil; alto Amazonas en el Perú; América central y México.

CATIE (1992) señala que, *Inga edulis* constituye la sombra más fácil y económica de manipular en lo que respecta a la poda, ya que puede mantenerse estable su altura a 4 - 5m., lográndose así resistencia al viento. Asimismo, presenta nódulos en abundante, posee una buena habilidad de establecimiento y sobrevivencia. Es tolerante a la sequía rigurosa (hasta 100 días/año). Su crecimiento rápido y rusticidad sugieren que podría ser útil para pequeños finqueros como fuente de leña y para su uso en barbechos mejorados.

Pennington y Fernández (1998) afirman que, *Inga* sp. es un árbol leguminoso de América, presente desde México (Oaxaca y Michoacán) hasta América del Sur. Familia Fabaceae, subfamilia Mimosoideae, se la cultiva por sus grandes vainas comestibles y por su aporte a la rotación de cultivos de fijación de nitrógeno, árbol de 4 hasta 30 m de alto, con un diámetro de 1 m. copa aplanada, amplia, muy extendida con follaje ralo, si dispone de espacio, forma una copa abierta que produce una sombra ligera. Tronco recto. Ramas largas. Corteza gris pálida con lenticelas, más o menos lisa con algunos surcos finos; interna de color rosado a castaño y ligeramente amarga con las ramillas ferruginosa-tomentulosas, lenticelas en ángulo o camellones. Hojas 10-18 cm, alternas, pinnadas y vellosas lanceoladas, deciduas, de 18 a 30 cm de largo pecíolos 0.3-2.0 cm largo, de redondos a alados, arregladas en 2 hileras divergentes; raquis 7.0-11.0 cm largo, alado, margen liso, con ambas superficies ligeramente vellosas elíptica, folíolos de 3.5-6.0 cm largo por 1.5-3.5 cm ancho, lanceolados a ovados, ocasionalmente elípticos, haz opaco, cenizo a pardo

amarillento, escamas denso en la nervadura principal, envés opaco. Inflorescencia generalmente de unas pocas espigas pedunculadas en las axilas de las hojas, o con frecuencia paniculada mediante la inserción de estos picos en los nodos sub-terminales; picos en su mayoría 6-8 cm de largo. Legumbre de hasta 1 m de largo y hasta 2 cm ancho o más ancho, ferruginoso-tomentosas, algo tetrágonos o subteretes, el margen casi en su totalidad cubre las caras. Flores esbeltas, sésiles o pediceladas, botones florales abiertos, lóbulos que se tocan sin llegar a soldarse a todo lo largo, las flores se tornan amarillo-verdosas a las pocas horas de abrir, las flores tienen estambres alargados y son de 5 a 7.5 cm de largo y de 7.5 a 9 cm de ancho, sólo una o dos flores se abren por día encada racimo, abren completamente al amanecer, marchitándose durante el día. Cáliz 1.0-1.8 cm largo, en forma de embudo, ocasionalmente semi-campanulado, robusto, liso estambres en un tubo estaminal inserto. El Fruto es una vaina ligeramente curva y de color castaño 8.0-18.0 cm largo, 1.3-2.2 cm ancho, 0.8-1.3 cm grosor, cilíndricos, acordonadas, rectas a espiraladas, y con 2 estrías anchas longitudinales, contienen una pulpa blanca, con pocas semillas y no se abren al madurar lineares, base sésil a atenuada. La información recopilada de cafetaleros sugiere que las raíces tienden a ser superficiales y muy divididas.

## 2.2.6. Cultivo del café

### Clasificación taxonómica

Arcila et al. (2010) indica que, el café pertenece al género *Coffea* con aproximadamente 100 especies, de las cuales únicamente tres de estas se mencionan como cultivadas comercialmente: *Coffea arabica* L. y *Coffea canephora* y presentan la siguiente clasificación taxonómica:

Reino	: Plantae
División	: Magnoliophyta
Subdivisión	: Angiospermae
Clase	: Magnoliata
Subclase	: Asteridae
Orden	: Rubiales
Familia	: Rubiaceae
Género	: <i>Coffea</i>

Especie : *Coffea arabica*, *Coffea canefora*

Fernández (1988) citado en Torres (2010) menciona que, el fruto está formado por:

**Epicarpio o exocarpio.** El color varío de verde a amarillo o rojo, rojo intenso y en algunos casos, hasta morado o negro.

**Mesocarpio o pulpa.** Está constituido por una gruesa capa de tejido esponjoso, rico en azúcares y mucílagos, cuyo espesor es de cerca de cinco milímetros.

**Pergamino.** Membrana de color amarillo de consistencia dura y frágil, compuesto principalmente por celulosa.

**Película plateada.** Capa más fina que la anterior, adherida a la almendra y constituida por celulosa.

**Grano o almendra.** Está formado de dos granos unidos por sus caras planas. Constituidos por azúcares, proteínas, grasa, minerales y alcaloides.

**Embrión.** Es el germen que se encuentra en la base del grano.

El fruto es una drupa, llamada corrientemente cereza, ovoidea, subglobulosa, roja; si está maduro mide de 10 a 15 mm de diámetro por 16 a 18 mm de largo, constituido por un exocarpio denominado piel cambiando su coloración según la maduración, un mesocarpio carnoso blanco amarillento denominado pulpa y dos semillas unidas por sus caras planas (Costa, 1980; en Torres, 2010).

### 2.2.7. Aspectos generales sobre el cultivo del café

El Instituto del Café de Costa Rica (2011), presenta los aspectos generales sobre el cultivo del café, se detallan a continuación:

**Altitud.** Incide en forma directa sobre los factores de temperatura y precipitación. La altitud óptima para el cultivo de café se localiza entre los 500 y 1700 m s.n.m. Por encima de este nivel altitudinal se presentan fuertes limitaciones en relación con el desarrollo de la planta.

**Precipitación.** La cantidad y distribución de las lluvias durante el año son aspectos muy importantes, para el buen desarrollo del cafeto. Con menos de 1000 mm anuales, se

limita el crecimiento de la planta y por lo tanto la cosecha del año siguiente; además, un período de sequía muy prolongado propicia la defoliación y en última instancia la muerte de la planta. Con precipitaciones mayores de 3000 mm, la calidad física del café oro y la calidad de taza puede comenzar a verse afectada; además el control fitosanitario de la plantación resulta más difícil y costoso.

**Temperatura.** La temperatura promedio anual favorable para el cafeto se ubica entre los 17 a 23 °C. Temperaturas inferiores a 10 °C, provocan clorosis y paralización del crecimiento de las hojas jóvenes.

**Humedad Relativa.** Cuando alcanza niveles superiores al 85 %, se propicia el ataque de enfermedades fungosas que se ven notablemente favorecidas.

**Viento.** Fuertes vientos inducen a la desecación y al daño mecánico de tejido vegetal, asimismo favorecen la incidencia de enfermedades. Por esta razón es conveniente escoger terrenos protegidos del viento, o bien establecer rompevientos para evitar la acción de éste.

#### **2.2.8. Sistemas Agroforestales**

Se describe así a un sistema de uso de la tierra en el cual los árboles se combinan temporal y espacialmente con pasturas (uso animal) o cultivos agrícolas; en la agroforestería interactúan elementos de la agricultura con elementos forestales que se traducen en sistemas de producción sostenibles en la misma unidad de terreno. También se define como un sistema de manejo sostenible de los cultivos y del suelo, mediante el cual se busca aumentar los rendimientos en forma continua, combinando la producción de las especies arbóreas con cultivos de valor económico, entre los cuales se incluyen pastos para la producción animal, en una forma simultánea o secuencial en la misma unidad de terreno, con aplicación de prácticas de manejo compatibles con las prácticas culturales de la población local (Duran, 2004).

Los sistemas agroforestales son sistemas de manejo de los recursos naturales dinámicos, con bases ecológicas que, por medio de la integración de árboles en tierras de finca y tierras abiertas, diversifica y sustenta la producción de productores para un aumento de los beneficios sociales, económicos y ambientales (Leakey, 1997).

### **2.2.9. Café bajo sombra en Perú**

Greenberg y Rice (1999) en Arcila et al. (2010) indican que, el café cultivado bajo sombra se planta, crece y se cultiva a la sombra de una cubierta de follaje forestal, a diferencia del café que se cultiva a pleno sol, o el completamente tecnificado, los que tienen muy pocos árboles o carecen de ellos completamente.

Benito (2010) reconoce que, las condiciones de selva peruana permiten plantear la implementación racional del cultivo del café bajo las siguientes alternativas: *Cultivo en bosque virgen, aclarado por entresaque selectivo*. Los pasos a seguir son “prospección y rozo”, desmonte parcial del bosque, tala y limpieza del terreno, trazado y apertura de hoyos, encalado y abonamiento de los hoyos y siembra del plantón de café. *Cultivo en bosque de segundo crecimiento o “purma” 3 aclarado por entresaque selectivo*. En este caso se puede adoptar casi el mismo procedimiento que el caso anterior, es decir, manejarla con criterio técnico para lograr un 50 % de luminosidad. *Cultivo bajo arborización reconstruida*. Para llegar a condiciones próximas a los ideales y como resultado de un complejo racionalmente tecnificado se siguen las siguientes etapas: Prospección del terreno y “rozo”, desmonte total del bosque y limpieza del terreno, trazado, apertura de hoyos, encalado y abonamiento para la arborización, y siembra del café.

### **2.2.10. Fijación de nitrógeno por *Inga* sp.**

La capacidad de fijación del nitrógeno se encuentra en diversos grupos fisiológicos. Estos tienen en común el hecho de ser procarióticos. El organismo mejor caracterizado en condiciones aerobias es el *Azotobacter*. En condiciones anaerobias, el mejor caracterizado es el *Clostridium*. Por su parte, diversas cianobacterias también han sido caracterizadas de forma certera. El *Azotobacter* es un organismo Gram (-), heterótrofo y móvil del suelo. El *Azotobacter* crece mejor en suelos neutros a alcalinos y mesofílicos. No prolifera cuando el pH está por debajo de 6 y no está presente en suelos ácidos. No resultan habituales poblaciones demasiado extensas. En consecuencia, no aportan al suelo demasiado nitrógeno fijado. Las bacterias *Beijerinckia* y *Derxia* ocupan el lugar del *Azotobacter* en suelos ácidos y tropicales. Los fijadores de nitrógeno anaerobios incluyen organismos como el *Clostridium pasteurianum*, un heterótrofo con un rango de pH intermedio, situado entre el *Azotobacter* y el *Beijerinckia*. Las cianobacterias pueden encontrarse en el suelo, a veces justo debajo de la superficie del mismo. Algunos pueden sobrevivir a un desecamiento extremo y formar

costras secas en prados y desiertos, los cuales inician el proceso de fijación del nitrógeno una vez que se humedecen.

### **2.2.11. Árboles fijadores de nitrógeno**

Se conocen aproximadamente 650 especies arbóreas fijadoras de nitrógeno. La mayoría de éstas son leguminosas originarias de los trópicos y de los subtrópicos. Al menos otras 9 familias de plantas tienen asociación con actinomicetos. La mayoría de las especies fijadoras de nitrógeno son arbustos o árboles pequeños de bosques secundarios; a menudo estas especies son componentes de sistemas agroforestales.

Los árboles más importantes en los sistemas agroforestales tienen los siguientes usos: forraje, abono verde, leña, pulpa, madera, sombra y cortinas rompevientos. Los árboles fijadores de nitrógeno tienen especial importancia en los sistemas agroforestales porque son una fuente de abono verde con alto contenido de nitrógeno, mejorando la fertilidad del suelo.

La fijación de nitrógeno caracteriza a la mayoría de las leguminosas (90 % de las Mimosoideae y Fabaceae, y 34 % de las Cesalpinoideae). Al menos el 90 % de éstas tienen su centro de origen en los trópicos. Géneros seleccionados en otras 9 familias vegetales, también fijan nitrógeno: Betulaceae, Casuarinaceae, Coriariaceae, Cycadaceae, Elaeagnaceae, Myricaceae, Rhamnaceae, Rosaceae y Ulmaceae. Las leguminosas poseen nódulos infestados con *Rhizobium*, mientras que las otras 9 familias involucran actinomicetos del género *Frankia*. Entre los árboles y arbustos fijadores de nitrógeno que han sido usados en sistemas agroforestales se encuentran leucaena, madero negro, *Acacia*, *Caliandra*, guaba, *Casuarina*, etc.

En general, las especies de *Inga* sp., son aptas y ampliamente usadas en sistemas de finca, donde se requieren árboles de sombra. Principalmente se usan como sombra para café, también en diversos sistemas agroforestales debido a su fácil germinación por semilla, rápido crecimiento, capacidad de fijar nitrógeno, adaptabilidad a una amplia variedad de suelos incluyendo ácidos, producción de mulch de lenta descomposición (control de malezas, liberación lenta de nutrientes y conservación de la humedad del suelo), y la posibilidad de ser combinada con otras especies del género para producir diversidad (Pennington, 1998).

Esta especie es originaria de la Amazonía y se distribuye desde los 260 S en Brasil y Ecuador hasta los 100 N en Honduras en América central. La distribución altitudinal varía de

0 a 1800 m s.n.m, con precipitaciones de 800 a 1200 mm por año, en una estación seca hasta de cuatro meses y temperaturas de 200 °C a 260 °C. Es común encontrarla a orillas de caminos y ríos en formaciones de bosques secundarios. Tolera suelos semipermeables y con alto contenido de aluminio. La especie posee una alta viabilidad (95 %), la cual se pierde rápidamente al menos que la semilla sea conservada a bajas temperaturas (5 °C) y alto contenido de humedad (25 %). Se ha logrado mantener una viabilidad de hasta un 70 % durante cuatro meses a 50 °C (Novoa, 1992).

### **2.3. Definición de términos básicos**

#### **Fijación biológica de Nitrógeno**

La fijación biológica de N<sub>2</sub> (FBN) consiste en la transformación del N<sub>2</sub> en NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, el cual se incorpora inmediatamente a compuestos orgánicos (aminoácidos). Es un proceso exclusivamente biológico realizado solo por algunos organismos procarióticos que poseen la enzima Nitrogenasa (Nasa) conocidos como diazótrofos, es decir consumidores de N<sub>2</sub> (di=dos; azoto=N; trofo=comer). La mayoría de los organismos diazótrofos tienen metabolismo quimio-órano-heterótrofo (aeróbicos y anaeróbicos), aunque también hay organismos foto-lito-autótrofos (oxigénicos y anoxigénicos). La FBN es un proceso reductor que consume gran cantidad de energía (se estima entre 12 a 24 ATP por mol de N<sub>2</sub> fijado) por lo que constituye una vía metabólica alternativa para los microorganismos: solo la realizan si no tienen otras fuentes de N que requieran menor costo energético, por ejemplo, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (Paredes, 2013).

#### **Sistemas agroforestales**

López (1992) define a los sistemas agroforestales, como formas de uso y manejo de los recursos naturales en los cuales, especies leñosas (árboles y arbustos), son utilizados en asociación deliberada con cultivos agrícolas y con animales, en un arreglo espacial (topológico) o cronológico (en el tiempo) en rotación con ambos; existen interacciones ecológicas y económicas entre los árboles y los otros componentes de manera simultánea o temporal de manera secuencial, que son compatibles con las condiciones socioculturales para mejorar las condiciones de vida de la región.

Las formas de producción agroforestal son aplicables tanto en ecosistemas frágiles como estables, a escala de campo agrícola, finca, región, a nivel de subsistencia o

comerciales. El objetivo es diversificar la producción, controlar la agricultura migratoria, aumentar el nivel de materia orgánica en el suelo, fijar el nitrógeno atmosférico, reciclar nutrientes, modificar el microclima y optimizar la producción del sistema, respetando el principio de sistema sostenido. El interés por este tipo de sistemas se debe a la necesidad de encontrar mejores opciones para los problemas de baja producción y degradación de la tierra en los trópicos.

### **Género *Inga* sp.**

El nombre genérico de *Inga* se deriva de Inca o Inga, vocablos de los indígenas del Perú. Otros autores le hacen derivar de Inga, nombre con el que los indígenas de Argentina designaban a algunos árboles muy peculiares de leguminosas (Hoyos, 1992). Este grupo de plantas de pequeño o mediano tamaño, tronco corto, copa globosa y frondosa, que se ramifica casi desde la base, es exclusivo de América tropical y tiene importancia en la agricultura, pues son reconocidos como la mejor sombra para los cafetales y cultivos de cacao, los cuales requieren de protección para su óptimo desarrollo, por lo que, son preferibles a los bucares y a cualquier otro árbol (Hoyos, 1992).

### **El café**

El café es uno de los cultivos más importantes mundialmente, posicionándose en el segundo lugar después del petróleo crudo. A partir de 1850, el café se comenzó a expandir con la promoción de los colonos europeos. El café representa una actividad económica importante en Centroamérica, representando alrededor del 10 % de la producción mundial, una revisión bibliográfica que se centró en identificar información relacionada con el cultivo de café. Se cree que Etiopía es el lugar de nacimiento original del café. Hay dos especies principales del cultivo de café: *Arabica* y *Robusta*. La filogenia molecular de las especies de café se basa en 28,800 polimorfismos de nucleótido unido definiendo relaciones entre las especies (Enríquez, 2020).

## CAPÍTULO III

### MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1. Ubicación de la investigación

La presente investigación se desarrolló en el Centro Poblado Las Pirias distrito de Chirinos, provincia de San Ignacio, región Cajamarca (Figura 2).

#### Características de la zona d estudio

La zona de estudio se encuentra entre las zonas bioclimáticas, del bosque húmedo – Montano Bajo Tropical (bh-MBT) y el bosque húmedo – Montano Tropical (bh-MT). La temperatura promedio de 18.8° C, la precipitación promedio anual es de 1541 mm, la humedad relativa es de 75.6 % (Vaca, 2003).

La vegetación lo conforman especímenes de diferentes familias botánicas como, Lauraceae, Orchidaceae, Cyatheaceae (helechos), plantas epífitas, algunas Bromeliaceae, entre otros grupos taxonómicos (Suclupe, 2007). Se observan claros (apertura del dosel) en el bosque natural por caída de árboles maduros, allí se originan otros grupos de plantas pioneras, que se van desapareciendo por la competencia con otras plantas de menor exigencia de luz para su desarrollo. La fauna se asocia a la producción de frutos silvestres para la alimentación de los animales silvestres como, majás (roedores), diferentes especies de aves, primates, entre otros (Suclupe, 2007).

#### 3.2. Materiales

**Material.** Muestras botánicas de ejemplares de *Inga* sp.

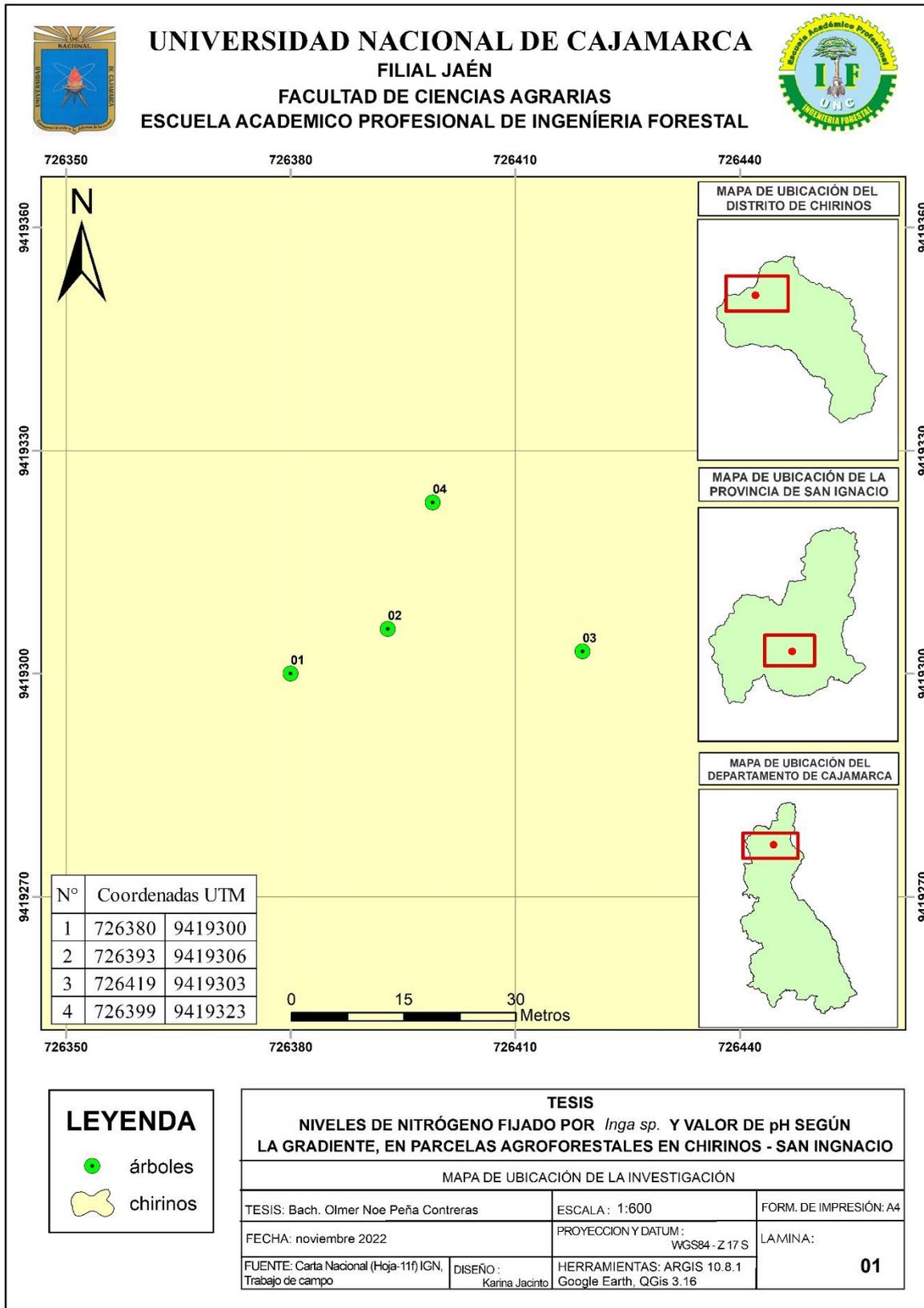
**Muestras de suelos.** Muestra de suelos de parcela con sombra de la especie *Inga* sp.

**Equipo, herramientas y material de campo.** Para realizar la siguiente investigación se utilizó una palana, un machete, un taladro para extracción se suelos, un balde, dos sacos de polietileno, una wincha, paja rafia, etiquetas y un GPS.

**Material y equipo de laboratorio.** El análisis y caracterización de las muestras de suelos, fueron realizadas por el laboratorio de suelos del Instituto de Cultivos Tropicales ubicado en la ciudad de Tarapoto, certificado de INDECOPI N° 00072183.

**Figura 2**

*Mapa de ubicación de la investigación*



### **3.3. Metodología**

#### **3.3.1. Trabajo en campo, gabinete y laboratorio**

En campo se localizaron y georreferenciaron 04 árboles adultos de *Inga* sp., al interior de una finca productora de café. Se trazó una línea a partir de la base el árbol, siguiendo la pendiente (hacia la menor altitud). Sobre la línea trazada, se ubicaron 03 puntos, distantes: 01, 02 y 03 metros, desde la base de la planta. En cada punto se realizó un hoyo de una profundidad de 20 cm, a una profundidad de 10.00 cm de la superficie del suelo, en este nivel se realizó el recojo de las muestras de suelo. Se realizó la determinación de la pendiente, a partir de la base del árbol, siguiente el sentido de nivel alto al más bajo, para ello se realizó una medición de 3.00 ml, y se procedió a medir la altura que determina el cambio vertical, calculando el tangente multiplicado por 100. Se realizó la caracterización dasométrica de los ejemplares de *Inga* sp., considerando: altura total, altura comercial, diámetro altura de pecho, proyección de copa. Se determinó la superficie de sombra (Área de proyección de copa), en metros cuadrados de cada individuo de *Inga* sp. Se colectaron muestras botánicas de la especie *Inga* sp., para la identificación taxonómica, que se llevara a cabo en consulta con especialistas acreditados.

#### **3.3.2. Selección del área de estudio**

Para la realización del presente trabajo de investigación, se seleccionó una parcela agroforestal, consistente en una finca de cafeto de 8.0 años de edad, asociada a arboles de la especie de *Inga densiflora* Benth, en ella se seleccionaron 04 árboles adultos, que se constituyeron en los referentes para la toma de muestras de suelos. Realizando la identificación de la muestra botánica y de suelo.

#### **3.3.3. Procesamiento de la información**

En gabinete, se procesaron los resultados de laboratorio y de campo, estos se discutirán con resultados de otros estudios a nivel regional, nacional e internacional.

#### **3.3.4. Análisis estadístico**

El diseño de la investigación aplicado es del tipo no experimental, de tipo transeccional descriptivo. Los datos obtenidos se analizaron se presentan en tablas, figuras y se determinó el coeficiente de correlación, para una mejor interpretación.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. Resultados

##### 4.1.1. Georreferenciación de los árboles adultos de *Inga densiflora* Benth

Los árboles objeto del análisis fueron localizados al interior de una finca productora de café, de aproximadamente una hectárea, localizada en un predio del Centro Poblado Las Pirias – distrito de Chirinos, en esta zona los agricultores se dedican al cultivo de café, el cual es favorecido por las condiciones climatológicas, con niveles medios de tecnología, esta práctica incorpora especies arbóreas que le brindan sombra al cultivo, se conoce que en mayor cantidad se plantan para sombra son del género *Inga*, con este fin.

**Tabla 1**

*Localización de árboles adultos del género Inga en la parcela*

N° de árbol	Coordenada Este	Coordenada Norte	Altitud m s.n.m	Pendiente (%)
1	0726380	9419300	1592	29.33
2	0726393	9419306	1622	28.66
3	0726419	9419303	1626	32.66
4	0726399	9419323	1622	32.66

En la tabla 1, se observa que la altitud oscila entre los 1592 a 1626 m s.n.m, que constituye una altitud adecuada para el cultivo del café, así mismo la pendiente oscila entre 29 y 32 %, presenta una variación de 3 puntos porcentuales, siendo la más alta para el árbol 4 y la más baja para el árbol 2, la parcela presenta una pendiente moderada donde se localizan el conjunto de árboles de sombra, la cota de ubicación es de 1622 m s.n.m., para el árbol 4 y 1592 m.s.n.m., para el árbol 5, la distancia entre ellos varía entre 20 y 25 metros.

##### 4.1.2. Identificación botánica de la especie

La identificación botánica de la especie, fue realizada por un experto (Anexo 2), los resultados reportados se presentan en la tabla 2.

**Tabla 2***Taxonomía de la especie*

Categorías	Sistema APG IV-2016	Sistema Cronquist 1981
Reino	Plantae	Plantae
División	Angiospermae	Magnoliophyta
Clase	Equisetopsida	Magnoliopsida
Subclase	Magnoliidae	Rosidea
Superorden	Rosanae	-----
Orden	Fabales	Fabales
Familia	Fabaceae	Fabaceae
Género	<i>Inga</i>	<i>Inga</i>
Especie	<i>Inga densiflora</i> Benth	<i>Inga densiflora</i> Benth

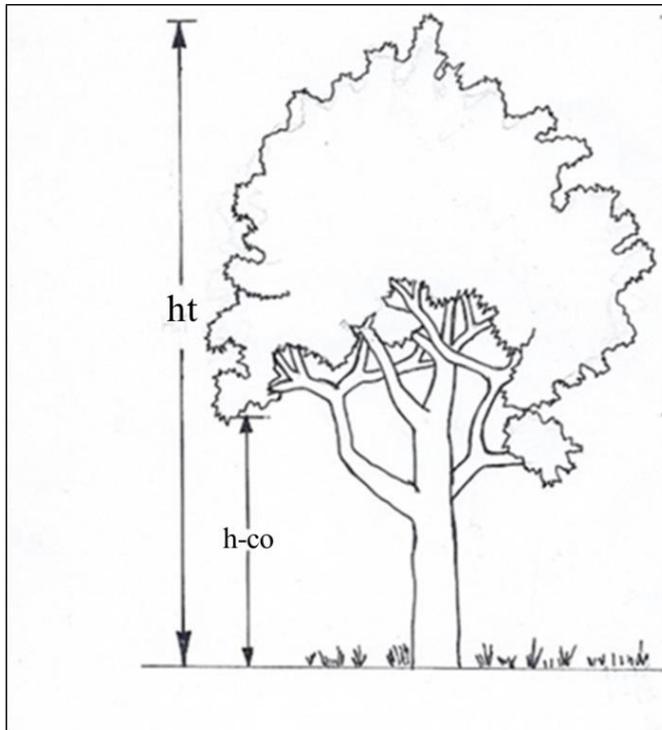
La especie colectada ha sido identificada como *Inga densiflora* Benth, conocida en la zona de estudio como “guaba”, nombre común que incluye a varios géneros, se encuentra ampliamente distribuida en la zona y es apreciada por su fruto, las flores son visitadas por abejas, aves y avispas y ha sido introducida al cultivo de cafeto como árbol de sombra, por la característica fijadora de nitrógeno.

**4.1.3. Características morfométricas de la especie**

Se registraron las características morfométricas de los 4 árboles adultos de la especie *Inga densiflora* Benth, considerados en la presente investigación, entre ellas se determinó la medida como: altura total (Ht), altura comercial (Hc), diámetro a la altura del pecho (DAP) (Figura 3), el área basal fue calculada usando la fórmula utilizada para el área del círculo:  $\pi r^2$  y para el cálculo del área de proyección de copa (APCo), se utilizó la fórmula para calcular el área de la elipse:  $\pi \times a \times b$  (siendo a y b, semiejes o diámetros mayor y menor) (Figura 4), donde se obtuvo los resultados siguientes:

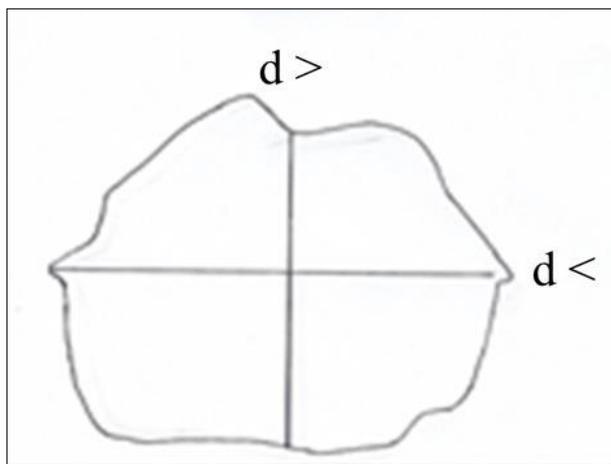
**Figura 3**

*Forma de medición de altura del árbol*



**Figura 4**

*Medición de decímetro de la base de la copa de un árbol*



**Tabla 3**

*Valores de mediciones morfométricas de árboles adultos de Inga densiflora Benth*

N° de árbol	Ht (m)	Hc (m)	DAP (cm)	AB (cm <sup>2</sup> )	APCo (m <sup>2</sup> )
1	12.40	8.20	25	490.8750	74.6444
2	12.00	9.30	23	415.4766	69.9006
3	17.00	8.50	24	452.3904	73.1364
4	18.00	9.00	28	615.7536	85.8050

En la Tabla 3, se observa que las mayores dimensiones morfométricas la presenta el árbol 4, con una altura total de 18.00 metros, diámetro a la altura del pecho de 28 cm., y área proyección de copa de 85.8050 m<sup>2</sup>; correspondiendo las menores dimensiones al árbol 1, las que son las siguientes: altura total 12.40 m, altura comercial de 8.20 m, DAP de 25.00 cm. Área basal 490.8750 cm<sup>2</sup>, y área de proyección de copa de 74.6444 m<sup>2</sup>. Las características de conformación del árbol son similares respecto a la arquitectura de la planta, teniendo en cuenta el fuste y la conformación de la copa, el propietario de la finca indicó que son árboles plantados de una edad aproximada de 10.00 años.

#### **4.1.4. Resultados del análisis de caracterización de suelos**

El análisis de caracterización de suelos, fue realizado en el Laboratorio del Instituto de Cultivos Tropicales de la ciudad de Tarapoto, acreditado con Certificado de INDECOPI N° 00072183, el laboratorio en mención ha utilizado la siguiente metodología:

**Tabla 4***Metodología de análisis de caracterización de las muestras de suelos*

Parámetro	Método
Textura	Hidrómetro
pH	Potenciómetro, suspensión agua-suelo relación: 1:2.5
Conductividad eléctrica	Conductímetro suspensión suelos-agua 1:2.5
Carbonatos	Gas-volumétrico
Fosforo disponible	Olsen modificado, Extract. $\text{NaHCO}_3 = 0.5\text{M}$ , pH 8.5 Vis
Potasio y Sodio intercambiable	$(\text{NH}_4)\text{CH}_3\text{-COOH} = 1\text{N}$ , pH 7 Absorción atómica.
Materia Orgánica	Walkley y Black
Calcio y Magnesio Intercambiable	Extrac. $\text{KCl} = 0.16$ $(\text{NH}_4)\text{CH}_3\text{-COOH} = 1\text{N}$ pH 7 Absorción Atómica
Acidez Interc.	Extrac. $\text{KCl}$ 1N Volumetría
Acidez Potencial	Woodruff Modificado
CIC pH 7.0	Acidez potencial + suma de bases
Fe, Cu, Zn y Mn	Olsen modificado extrac. $\text{NaHCO}_3 = 0.5\text{M}$ , pH 8.5, Absorción atómica.
Boro	Extracción, espectrometría UV ( $\lambda = 555$ nm)
Azufre	Extracción, turbidimetría ( $\lambda = 420$ nm)
Metales pesados	EPA 3050B

**Tabla 5***Resultados de análisis de caracterización de suelos*

Árbol	Campo	pH	C.E. dS/m	CaCO <sub>3</sub>	M.O. (%)	N (%)	P ppm	K ppm
I	I.1	7.22	0.10	0.13	3.13	0.14	3.65	261
I	I.2	6.86	0.13	>0.1	2.76	0.12	3.08	168
I	I.3	6.71	0.13	>0.1	3.98	0.18	4.81	76
II	II.1	6.62	0.06	>0.1	2.76	0.12	2.31	296
II	II.2	6.62	0.05	>0.1	2.58	0.12	3.08	560
II	II.3	6.49	0.08	>0.1	3.36	0.15	4.62	480
III	III.1	6.19	0.05	>0.1	3.04	0.14	4.23	240
III	III.2	5.77	0.07	>0.1	3.68	0.17	0.58	213
III	III.3	5.36	0.09	>0.1	4.20	0.19	5.00	262
IV	IV.1	5.67	0.22	>0.1	4.63	0.21	17.69	100
IV	IV.2	6.07	0.28	>0.1	7.85	0.35	8.65	81
IV	IV.3	5.46	0.07	>0.1	3.59	0.16	2.50	207

En la tabla 5, se observa los resultados reportados del análisis de suelos, se considera que el suelo de esta parcela presenta condiciones nutricionales medias, presenta niveles medio-bajos de nitrógeno (0.17 %), nivel medio de materia orgánica (3.80 %), niveles bajos de fósforo (5.02 ppm) y nivel alto de potasio (245.33 ppm) (Vela, 2011), encontró datos similares en la región San Martín, para el mismo cultivo y considera bajos para nitrógeno y fósforo y alto para potasio. En referencia al pH, este presenta un valor promedio de 6.25, calificado como ligeramente ácido, que se encuentra dentro del rango adecuado para el cultivo de café.

Con respecto a las propiedades del suelo materia de estudio se aprecia que existe una variación respecto a los puntos de muestreo y el número de árbol, presentando un comportamiento distinto para cada caso, para nitrógeno y pH.

#### **4.1.5. Nitrógeno presente en suelo en relación a la gradiente**

El análisis de suelos realizado reporta diferentes porcentajes de nitrógeno en relación a la pendiente y al pH, como se puede apreciar en la tabla 6.

**Tabla 6***Niveles de nitrógeno y valores de pH en relación a la pendiente*

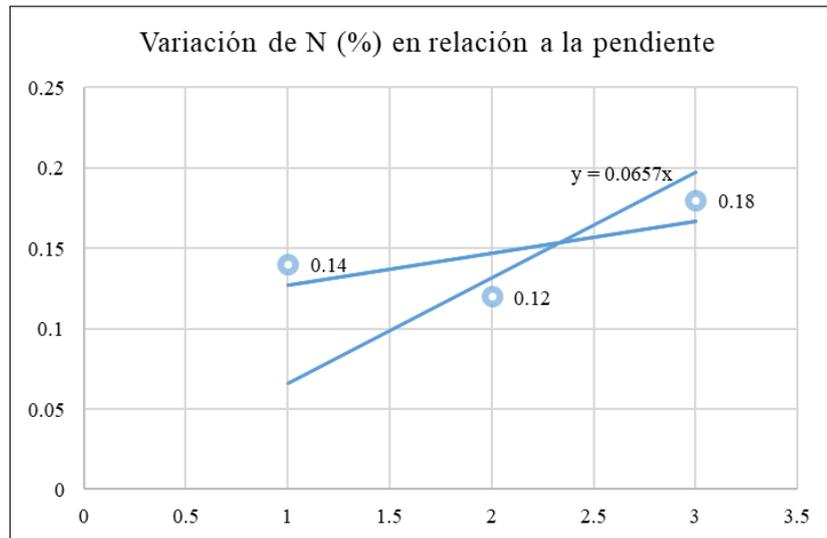
Árbol	Campo	Distancia	Pendiente	N (%)	pH	APCo m <sup>2</sup>
I	I.1	1.00	29.33	0.14	7.22	74.6444
I	I.2	2.00		0.12	6.86	
I	I.3	3.00		0.18	6.71	
II	II.1	1.00	28.66	0.12	6.62	72.9008
II	II.2	2.00		0.12	6.62	
II	II.3	3.00		0.15	6.49	
III	III.1	1.00	32.66	0.14	6.19	70.8745
III	III.2	2.00		0.17	5.77	
III	III.3	3.00		0.19	5.36	
IV	IV.1	1.00	32.66	0.21	5.67	85.8050
IV	IV.2	2.00		0.35	6.07	
IV	IV.3	3.00		0.16	5.46	

**4.1.6. Variación de nitrógeno en relación a la pendiente**

La presencia de nitrógeno porcentual es variable en el suelo de cada árbol, observándose un comportamiento diferente para la distancia de cada punto determinado y de pendiente como se puede apreciar en las figuras que se muestran a continuación:

### Figura 5

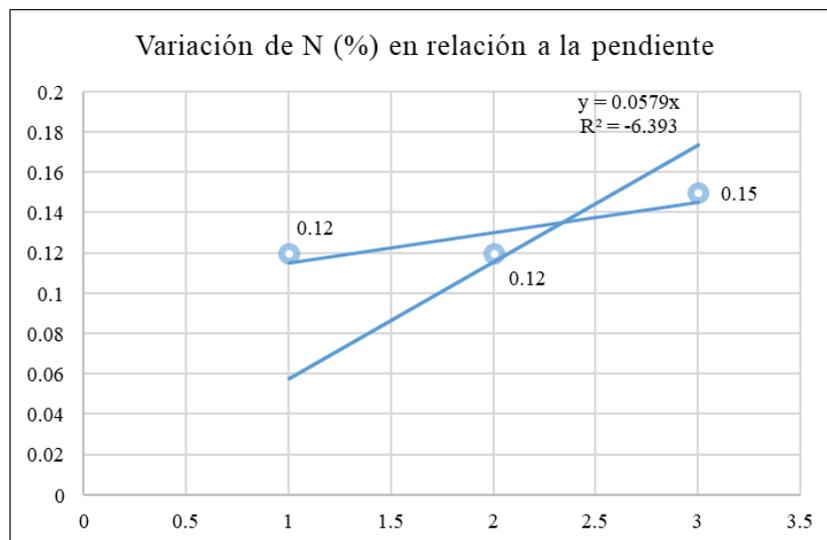
*Variación de Nitrógeno del Árbol 1 en relación a la pendiente*



En la figura 5, el árbol 1, presenta variación de niveles de concentración de nitrógeno porcentual, así se tiene que a la distancia de 1.00 m, presenta 0.14 %, a 2.00 m, 0.12 y 0.18 a la distancia de 3.00 m, la concentración es de 0.18 % ligeramente superior a las encontradas anteriormente, el coeficiente de correlación es de 0.65, el cual indica que el grado de asociación de estas variables presentan una correlación positiva moderada.

### Figura 6

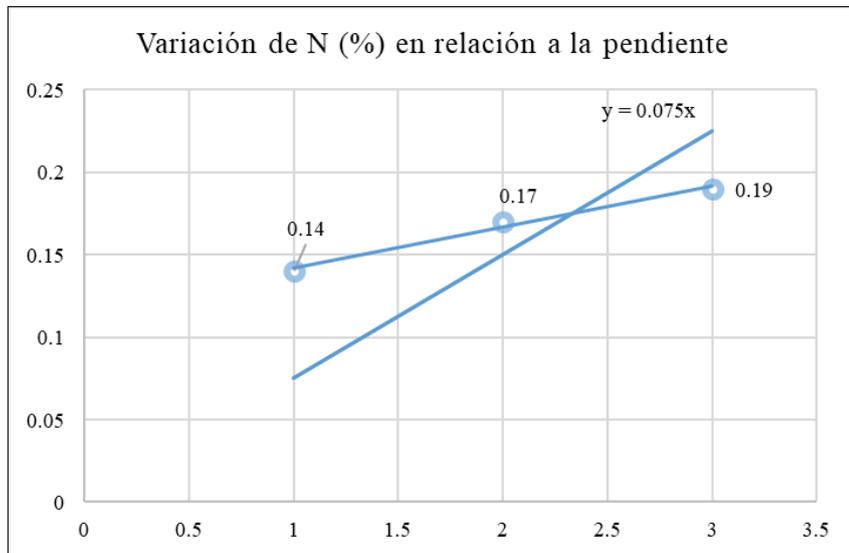
*Variación de Nitrógeno del Árbol 2 en relación a la pendiente*



De acuerdo a la figura 6, el árbol 2, tiene variación relativamente uniforme de los niveles de presencia de nitrógeno porcentual, observándose que a la distancia de 1.00 m, presenta 0.12 %, a 2.00 m, 0.12 y a la distancia de 3.00 m, la concentración es de 0.15 %, el coeficiente de correlación es de 0.87, que indica que el grado de asociación de estas variables tienen una correlación positiva fuerte.

### Figura 7

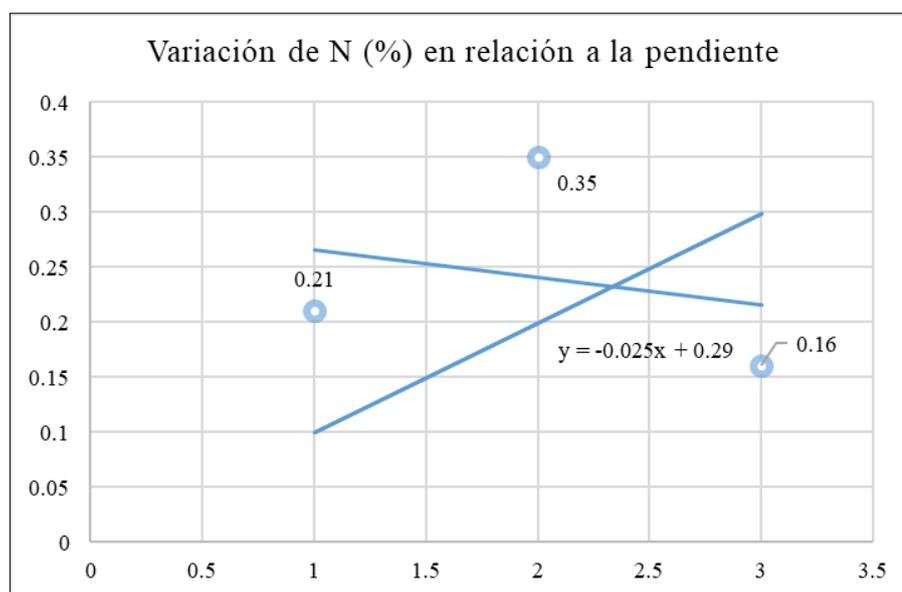
*Variación de Nitrógeno del Árbol 3 en relación a la pendiente*



La figura 7, indica que el árbol 2, tiene variación que experimenta un crecimiento de la concentración de nitrógeno, en relación a la distancia, en él se observa que a la distancia de 1.00 m, presenta 0.14 %, a 2.00 m, 0.17 y a la distancia de 3.00 m, la concentración es de 0.19 %, el coeficiente de correlación es de 0.99, que indica que, el grado de asociación de estas variables es positiva perfecta.

**Figura 8**

*Variación de Nitrógeno del Árbol 4 en relación a la pendiente*



En la figura 8, el árbol 4, presenta un comportamiento irregular, en relación a la concentración de nitrógeno porcentual, así se tiene que a la distancia de 1.00 m, presenta 0.21 %, a 2.00 m, 0.35 y 0 la distancia de 3.00 m, la concentración es de 0.16 %, el coeficiente de correlación es de - 0.25, que indica que el grado de asociación de estas variables es débil.

**Tabla 7**

*Niveles de nitrógeno (%) en relación a la distancia en el sentido de la pendiente*

Variación de nitrógeno en relación a distancia (%) y Árbol					
Distancia (m)	Árbol 1	Árbol 2	Árbol 3	Árbol 4	Prom/Distancia
1	0.14	0.12	0.14	0.21	0.15
2	0.12	0.12	0.17	0.35	0.19
3	0.18	0.15	0.19	0.16	0.17
<b>Prom/Árbol</b>	0.15	0.13	0.17	0.24	

En la tabla 7, se aprecia que el árbol 4, presenta el mayor nivel de nitrógeno porcentual (0.24 %), teniendo una segunda ubicación el árbol 3, (0.17 %) seguido del árbol 1, (0.15 %) y finalmente el árbol 2, con una concentración de 0.13 %; sin embargo el árbol 4 presenta un coeficiente de correlación negativo, es decir que la asociación débil que presenta con la variable gradiente y distancia, indica que la concentración de nitrógeno presente no está relacionada directamente a esta, a diferencia que en todos los casos la asociación es positiva.

En la Tabla 7, se aprecia que la concentración promedio más importante del nitrógeno ocurre a la distancia de 2.00 m, (19.00 %), seguido de la distancia de 3.00 m, (17.00 %) y la menor concentración se localiza en el primer metro de distancia respecto al árbol. La presencia de mayor concentración de nitrógeno podría estar influenciada por la mayor presencia de raicillas que generan condiciones para la presencia de bacterias nitrificantes, Dugan (2004) en Mayz-Figueroa (2004) demostró que, la fijación biológica de nitrógeno, en los suelos tropicales con las condiciones requeridas de humedad, temperatura y materia orgánica es generalmente alta, reporta que el número de bacterias fijadoras de nitrógeno es particularmente elevado en la zona adyacente a la raíz (Rizósfera), debido a la liberación de compuestos orgánicos que le sirven como nutrimento.

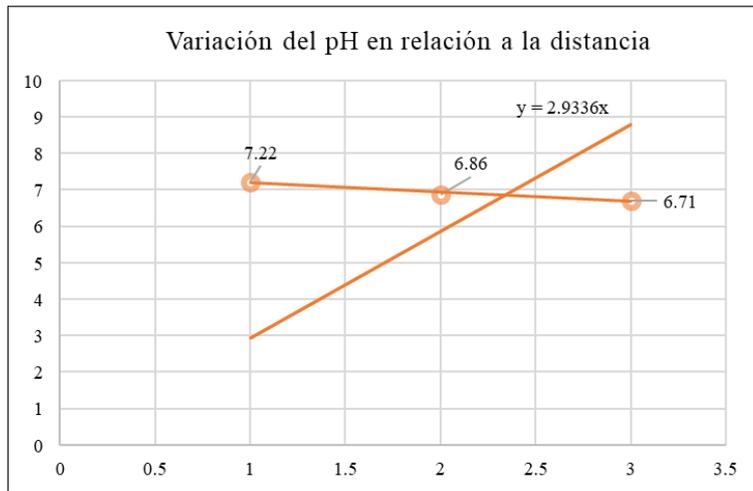
Ávila (2002) afirma que, las pérdidas de N mineral en el agua de escorrentía fueron bajas con relación al aporte del fertilizante. Las pérdidas en el sistema café – *Eucalyptus deglupta* con mayor pendiente (33-51 %) fueron significativamente mayores que a pleno sol y bajo *Eucalyptus deglupta* con pendientes de 8 a 9 %. El efecto de la fertilización en el aumento de la concentración de N mineral en el agua de escorrentía superficial ocurrió en los primeros ocho días subsiguientes a la aplicación.

#### **4.1.7. Variación del pH en relación a la distancia y gradiente**

El pH, presente, tiene un comportamiento variable para cada árbol, registra variaciones de 5.36 (Árbol 3 – campo III) y el valor de 7.22 (Árbol 1 – campo I-1), estas variaciones la podemos apreciar en las figuras 5, 6, 7 y 8.

**Figura 9**

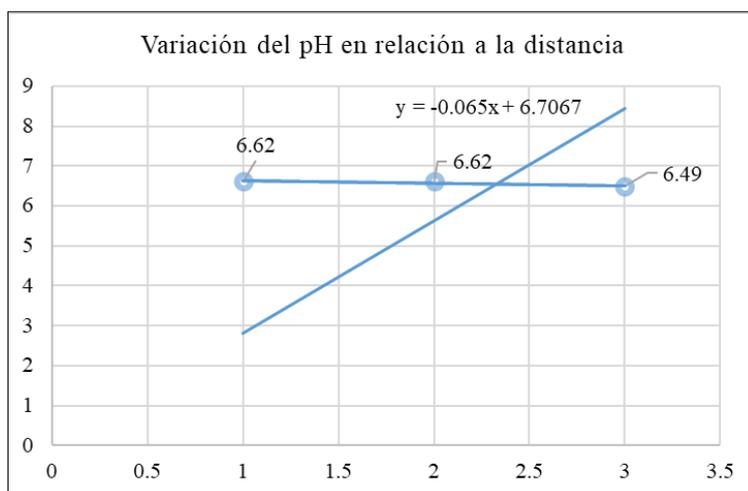
*Variación de pH en relación a la distancia del Árbol 1*



La figura 9, se aprecia que el árbol 1, presenta variación de pH, así se tiene que a la distancia de 1.00 m, presenta un valor de pH de 7.22, a 2.00 m, 6.86 y 6.71 a la distancia de 3.00 m, el pH presenta un mayor valor a la distancia más cercana al árbol, y disminuye gradualmente, en la medida que la distancia en el sentido de la gradiente es mayor, el coeficiente de correlación es de - 0.97, el cual indica que el grado de asociación de estas variables presentan una correlación negativa fuerte, pues en tanto la distancia es mayor el pH disminuye.

**Figura 10**

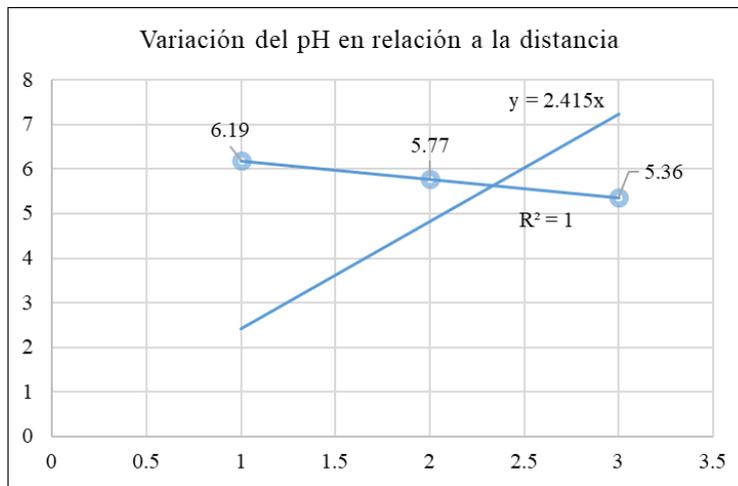
*Variación de pH en relación a la distancia del Árbol 2*



En la figura 10, se observa que, el árbol 2, registra variación en el pH, así se tiene que, a la distancia de 1.00 m, presenta un valor de pH de 6.22, a 2.00 m., 6.62 y 6.49 a la distancia de 3.00 m, el pH presenta un valor similar en el primer y segundo punto y una ligera variación en el último punto (campo II-3), el coeficiente de correlación es de - 0.87, el cual indica que, el grado de asociación de estas variables corresponde a una correlación negativa fuerte, pues en tanto la distancia es mayor el pH disminuye.

### Figura 11

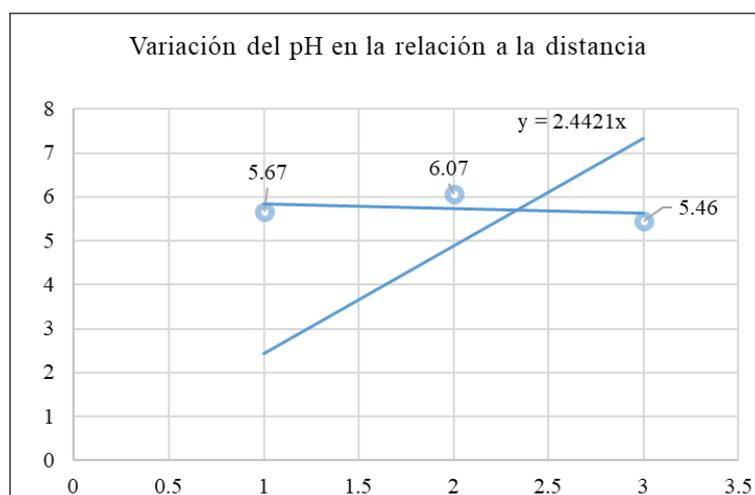
*Variación de pH en relación a la distancia del Árbol 3*



En la figura 11, observamos que, el árbol 3, muestra también variación en el pH, así se tiene que, a la distancia de 1.00 m, presenta un valor de pH de 6.19, a 2.00 m, 5.77 y 5.36 a la distancia de 3.00 m, el pH en este caso muestra una disminución gradual de forma ascendente, el coeficiente de correlación es de - 0.99, el cual indica que, el grado de asociación de estas variables corresponde a una correlación negativa perfecta, pues en tanto la distancia es mayor el pH disminuye.

**Figura 12**

*Variación de pH en relación a la distancia del Árbol 4*



En la figura 12, se observa que el árbol 4, presenta variación en el pH, así se tiene que a la distancia de 1.00 m, presenta un valor de pH de 5.67, a 2.00 m., 6.07 y 5.46 a la distancia de 3.00 m, el pH en este caso se aprecia que presenta una curva que muestra un incremento y luego un ligero descenso, el coeficiente de correlación es de - 0.34, el cual indica que el grado de asociación de estas variables corresponde a una correlación negativa débil.

**Tabla 8**

*Valor del pH en relación a la distancia en el sentido de la gradiente*

Variación del pH en relación a distancia (%) y Árbol					
Distancia (m)	Árbol 1	Árbol 2	Árbol 3	Árbol 4	Prom/Distancia
1	7.22	6.22	6.19	5.67	6.33
2	6.86	6.62	5.77	6.07	6.33
3	6.71	6.49	5.36	5.46	6.01
<b>Prom/Árbol</b>	6.93	6.44	5.77	5.73	6.22
<b>( r )</b>	-0.97	-0.87	-0.99	-0.34	

En la Tabla 8, se aprecia que, el valor más alto del pH, es para el árbol 1, con 6.93, corresponde una segunda ubicación al árbol 2, con 6.44, finalmente el árbol 4, tiene el valor más bajo con 5,73. También en la Tabla 8, se observa que, el valor promedio más importante del pH, se encuentra a 1.00 y 2.00 m, de distancia, el menor valor se localiza en el tercer metro de distancia respecto al árbol.

El pH es un factor importante para el cultivo del café, los niveles reportados se encuentran dentro del rango aceptable, según Arancel (2016) sobre el pH, afirma que, es la medida de la acidez del suelo, debe estar, según algunos especialistas, entre 4,5 – 5,5; estos valores indican que, el café es una planta tolerante a suelos ácidos. Las zonas de VRAE, Jaén, Satipo, Villa Rica, Oxapampa, San Juan del Oro, Lamas, Moyobamba y Rioja, cuentan con suelos adecuados en pH (4,5 – 5,5). Rodríguez de Mendoza es la zona que cuenta con mejores suelos con un pH de 6,2. Mientras que las zonas de Utcubamba, Bagua, San Ignacio, Quillabamba, Tingo María, Chanchamayo y Tocache cuentan con un pH menor a 4,5, indicando presencia de toxicidad de aluminio en el complejo de cambio y que dificulta el desarrollo de las raíces y la absorción de nutrientes.

Sadzawka (2003) menciona que, un suelo sea ácido o alcalino depende de los procesos naturales y de actividades humanas, los procesos naturales incluyen factores edáficos (del suelo), biológicos y climáticos, por ejemplo, los suelos desarrollados a partir de materiales graníticos son más ácidos que los desarrollados de materiales parentales calcáreos. La descomposición de la materia orgánica genera ácidos orgánicos y anhídrido carbónico que acidifican el suelo, las plantas que fijan el nitrógeno simbióticamente (porotos y alfalfa, por ejemplo), también lo acidifican, sin embargo, la lluvia es el principal controlador del pH de la mayoría de los suelos agrícolas.

Villatoto et al. (2008) indican que, distanciamientos bajo (27 m) para pH, refleja una baja autocorrelación espacial también encontrada en otros estudios, también se observa una dependencia espacial o estructural aún a 115 m de un punto a otro al medir el P, lo cual sugiere un efecto de autocorrelación fuerte que puede deberse a algún factor de gran influencia, estos datos estarían reflejando que, en el caso del pH, los muestreos podrían ser más distanciados y el cambio en las estimaciones no variaría mucho, como ocurriría si se distancia los puntos muestreados para P, el cual tiene una alta auto correlación espacial y depende de más cantidad de observaciones a su alrededor para predecir los puntos no muestreados.

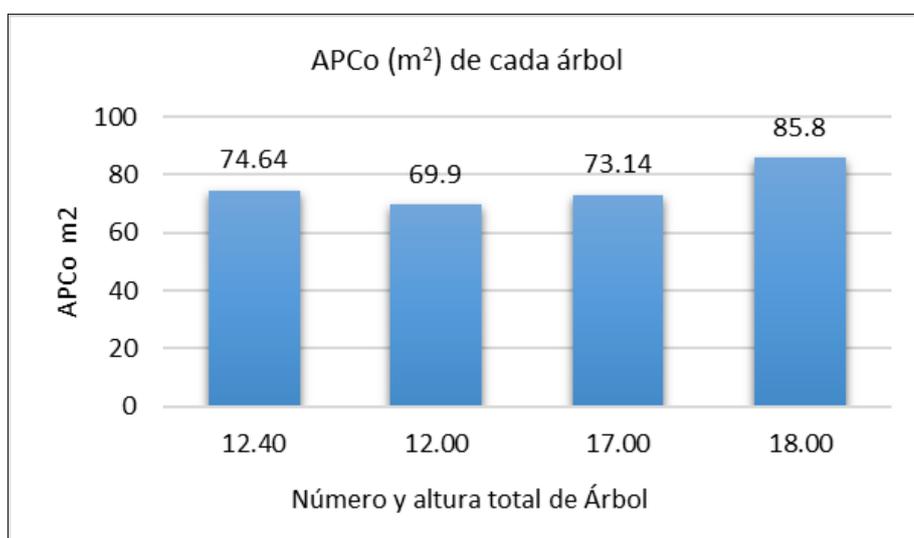
Mollinedo et al. (2005) en un trabajo realizado relación suelo-árbol y factores de sitio, en plantaciones jóvenes de teca (*Tectona grandis*), en la zona oeste de la cuenca del canal de Panamá encontraron que, el valor de pH en los suelos de las parcelas bajo estudio varió entre 4,90 y 5,95, valores considerados como moderadamente ácidos. Al estudiar la variación del incremento medio anual en volumen (IMA Vol) en función del pH en los primeros 20 cm de suelo, se encontró que en las PPM con pH=5,5 el IMA Vol fue de 14 m<sup>3</sup> ha-1 año-1, mientras que cuando el pH era >5,5 los incrementos fueron >20 m<sup>3</sup> ha-1 año-1

#### 4.1.8. Área de proyección de copa (APCo) en relación a la altura del árbol

El área de proyección de copa (APCo), que es la cobertura sobre el suelo por la sombra del árbol, tiene especial importancia para la planta, en relación a las condiciones climáticas (Viento, radiación solar e evapotranspiración), el cultivo presentara un mejor o menor crecimiento y desarrollo, relacionada a la presencia de los árboles de sombra, estos cambios la podemos apreciar en la figura 13.

**Figura 13**

*Correlación de la altura total del árbol y Área de Proyección de Copa (Cobertura)*



En la figura 13, se observa que el árbol 1, tiene una altura de 12.40 m, y 74.64 m<sup>2</sup> de APCo, el árbol 4, que reporta la mayor altura, (18.00 m), presenta una APCo de 85.80 m<sup>2</sup>, sin embargo, el árbol 2, con 12.00 m de altura presenta la menor APCo, así mismo se aprecia que el árbol 3, con 17.00 m de altura tiene una menor APCO, que el árbol 1, que presenta menor altura, el coeficiente de correlación es de 0.71, que es significativo. Vásquez (2013)

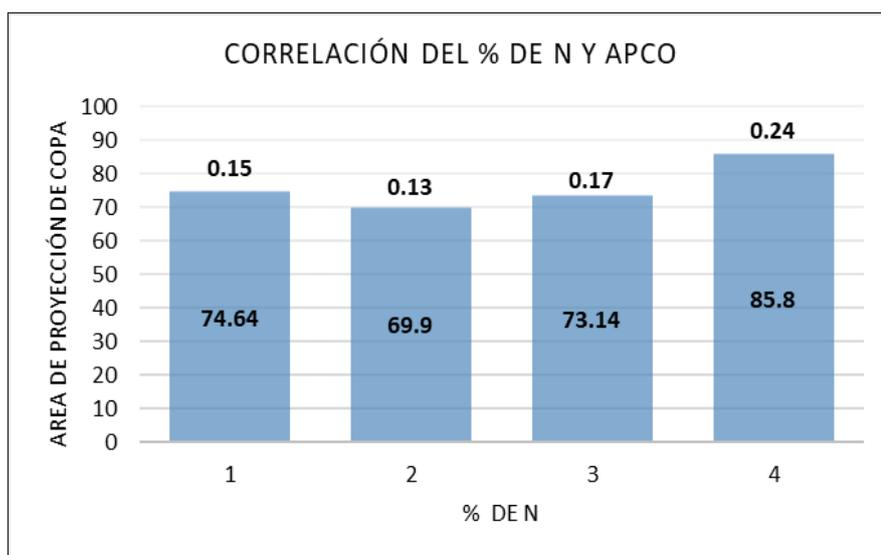
encontró que, la relación alométrica de la altura total y área de copa. Para todas las especies las relaciones entre la altura total y área de copa todas fueron altamente significativas  $P < 0.0001$ . Las ecuaciones de regresión presentaron valores de coeficiente de determinación ( $R^2$ ) que varían entre 0.48 y 0.88, lo cual indica que existe una buena relación entre las variables evaluadas.

#### 4.1.9. Variación del Nitrógeno en relación a la cobertura (APCo)

La presencia de nitrógeno porcentual en relación a la cobertura (APCo), tiene un comportamiento bastante regular, así se tiene que en tanto se incrementa la cobertura, se incrementa la presencia del nitrógeno porcentual, como lo podemos apreciar en la figura 14.

**Figura 14**

*Variación de Nitrógeno en relación a la cobertura APCo*



En la figura 14, que antecede se aprecia que el menor porcentaje de nitrógeno (0.13 %), le corresponde al árbol 2, que también presenta la menor área de proyección de copa ( $69.90 \text{ m}^2$ ) y el mayor porcentaje de nitrógeno (0.24 %), se encuentra en el árbol 4, con un área de proyección de copa de  $85.90 \text{ m}^2$ , presentan un Coeficiente de correlación de 0.97, que sugiere una correlación perfecta.

## 4.2. Discusión

Los resultados obtenidos son coincidentes con los que reporta Baraër (2013), en Villarreyna (2016), a través de su estudio realizado sobre, determinantes del ciclo del nitrógeno en sistemas agroforestales con café en Costa Rica (diferentes niveles y especies de sombra), encontró una fuerte relación entre la mineralización y el tipo de sombra. En el estudio se analizó la mineralización aeróbica y anaeróbica (en laboratorio), a partir de muestras de suelo tomadas de diferentes tratamientos. Con respecto a la mineralización anaeróbica, se observó que suelos bajo café a pleno sol obtuvieron la tasa más lenta (1.7 mg N/kg de suelo) de todos los tratamientos, y al contrario suelos bajo café y *Erythrina poeppigiana*, árbol fijador de nitrógeno, presentaron la tasa más rápida de mineralización (5.64 mg N/kg de suelo). La mineralización aeróbica fue igualmente superior bajo los árboles de sombra, en comparación con el tratamiento a pleno sol. Las especies leguminosas fijadoras de nitrógeno (*Erythrina poeppigiana*, *Chloroleucon eurycyclum*), brindaron los datos más altos al respecto.

Estudios realizados por Escalante et al. (1984) en plantaciones de café y cacao sin fertilización con sombra *Inga*, *Gliricidia sepium* y *Erythrina poeppigiana* reportaron una fijación de nitrógeno de 35-60 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. Estos mismos autores estimaron que fueron liberados entre 57-66 kg de N ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> a través de la mortalidad y descomposición de nódulos de *Erythrina poeppigiana* no podada, sin diferenciar entre el contenido de N en los nódulos (22-23 kg de N ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) entre parcelas fertilizadas y no fertilizadas.

Nygren y Ramírez (1995) encontraron, una liberación de 6.8 a 35.4 g N árbol<sup>-1</sup> en un ciclo de poda de 23 semanas (9.6 a 50 kg de N ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) a través de la mortalidad y descomposición de nódulos de *Erythrina poeppigiana*. Estos dos estudios sugieren que una proporción significativa de N<sub>2</sub> fijado por los árboles de sombra puede ser transferido dentro del suelo a plantas no fijadoras de N<sub>2</sub>. Para Thériez (2015), el contenido de materia orgánica en los suelos se ve favorecido por los árboles de sombra. Estudios realizados han demostrado que hay mayor cantidad de materia orgánica en cafetales con árboles. Así mismo, Cerda et al. (2015), en un estudio realizado con diferentes niveles y especies de sombra, encontraron que la mayoría de los elementos de la fertilidad del suelo fueron mejores bajo sombra diversificada, como el caso de menor acidez y buenos contenidos de potasio, dos indicadores claves de la calidad del suelo.

La sombra favorece el reciclaje de nutrientes, sobre todo los procesos de mineralización y nitrificación del nitrógeno, uno de los elementos fundamentales en los rendimientos del café (Baraër, 2013). También es importante destacar que la sombra reduce la evaporación del agua del suelo (Lin, 2010), debido a la intercepción de la luz solar y a la presencia del mantillo que protege el suelo (mantillo generado por los árboles) (Rapidel et al., 2015), lo cual también es beneficioso para los microorganismos que se encargan de la descomposición de la materia orgánica. Todos estos efectos de sombra sobre el suelo, anteriormente explicados, tienen un efecto directo sobre los rendimientos, debido a que todos tienen que ver con la fertilidad del suelo y la fertilidad del suelo es uno de los elementos fundamentales en el rendimiento de los cultivos.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

La especie colectada ha sido identificada como *Inga densiflora* Benth, es conocida en la zona como “Guaba”, nombre común que incluye a varias especies, se encuentra ampliamente distribuida en la zona y es apreciada por su fruto, las flores son visitadas por abejas, aves y avispa y ha sido introducida al cultivo de café como árbol de sombra, por la característica fijadora de nitrógeno.

Respecto a las dimensiones morfométricas el árbol 4, presenta las mayores dimensiones con altura total de 18.00 metros, diámetro a la altura del pecho de 28 cm, y área proyección de copa de 85.8050 m<sup>2</sup>; correspondiendo las menores dimensiones al árbol 1, con una altura total 12.40 m, altura comercial de 8.20 m, DAP de 25.00 cm, Área basal 490.8750 cm<sup>2</sup>, y área de proyección de copa de 74.6444 m<sup>2</sup>.

Los resultados reportados del análisis de caracterización de suelos, establecen que el suelo de esta parcela presenta condiciones nutricionales medias, con niveles medio-bajos de nitrógeno (0.17 %), nivel medio de materia orgánica (3.80 %), niveles bajos de fósforo (5.02 ppm) y nivel alto de potasio (245.33 ppm), entre los principales.

La concentración promedio más importante del nitrógeno ocurre a la distancia de 2.00 m (19.00 %), seguido de la distancia de 3.00 m (17.00 %), y la menor concentración se localiza en el primer metro de distancia respecto al árbol.

El nitrógeno en menor porcentaje fue de 0.13 %, le corresponde al árbol N° 2, que también presenta la menor área de proyección de copa (69.90 m<sup>2</sup>) y el mayor porcentaje de nitrógeno (0.24 %), la presenta el árbol N° 4, con un área de proyección de copa de 85.90 m<sup>2</sup> presentan un Coeficiente de correlación de 0.97, que sugiere una correlación perfecta.

El valor más alto del pH, la alcanza el árbol N° 1, con 6.93, corresponde una segunda ubicación al árbol N° 2, con 6.44, finalmente el árbol N° 4, tiene el valor más bajo con 5.73. También en la Tabla N° 8, se observa que el valor promedio más importante del pH, se encuentra a 1.00 y 2.00 m de distancia, el menor valor se localiza en el tercer metro de distancia respecto al árbol.

## **5.2. Recomendaciones**

Se deben realizar evaluaciones de concentración de nitrógeno y valores de pH, a distancias mayores de los árboles utilizados como sombra en las fincas cafetaleras, donde se deben incluir mayor cantidad de árboles, especies y mayor número de fincas, que permitan obtener mejores resultados en cuanto al comportamiento de las especies empleadas como sombra.

También se deben realizar investigaciones que involucren la identificación de los microorganismos participantes en la fijación biológica de nitrógeno.

## CAPÍTULO VI

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allan, D. and Graham, P. (2002). *Soil Biology and Fertility: Symbiotic Nitrogen Fixation, Dep. of Soil, Water and Climate*. University of Minnesota. <http://www.Soils.agri.unm.edu/academics/clases/s>
- Arancel, R. (2016). *Efecto de las propiedades del suelo en la producción y calidad del café (Coffea arabica L.) variedad catimor en la microcuenca de Pampa Camona – Pichanaqui*. Tesis de grado para optar el Título de Ingeniero en Ciencias Agrarias – Especialidad Agronomía, Universidad Nacional del Centro – Satipo.
- Arcila, J., Farfán, F., Moreno B., Salazar, F., Hincapié, E. (2010). *Sistemas de Producción de café en Colombia*. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. 310 p.
- Ávila R, HE. (2002). *Dinámica del nitrógeno en el sistema agroforestal Coffea arabica con Eucalyptus deglupta en la zona sur de Costa Rica*. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 87 p.
- Baca, B.E., Soto, L., Pardo, M.E. (2000). *Fijación biológica de nitrógeno*. Elementos (Revista Trimestral). Elementos N° 38. Vol. 7, junio-agosto 2000.
- Baraër, T. (2013). *Déterminants du cycle de l'azote dans des systèmes agroforestiers de caféiers au Costa Rica. Mémoire de fin d'études d'ingénieur*. CIRAD/CATIE. 36 p.
- Barrance, A., Beer, J., Boshier, D., Chamberlain, J., Cordero, J., Detlefsen, G., Pennington, T. (2003). *Árboles de Centro América*. Costa Rica: Turrialba.
- Bertsch, F. (1995). *La Fertilidad de los Suelos y su Manejo*. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. San José. 157 p.
- Casas A., Caballero J., Mapes C. y Zárate S. (1997). *Manejo de la vegetación, domesticación de plantas y origen de la agricultura en Mesoamérica*. Boletín de la Sociedad Botánica de México 61:31-47.
- Duran, Y. (2004). *Sistemas agroforestales. Santa Fe de Bogotá, Colombia: UNAD*. 56 p. <http://www.unad.edu.co/pages/cursos/agrarias.htm>

- Enriquez, J., Retex-Caliz, R., Vásquez-Reyes, E. (2020). *Importancia, genética y evolución del café en Honduras y el mundo*. INOVARE Revista de Ciencia y Tecnología. Vol. 7 p.
- Escalante, G; Herrera, R. y Aranguren, J. (1984). *Nitrate fixation in shade trees (Erythrina poeppigiana) in cacao plantations in North Venezuela*. Pes Agropec Bras 19 (s/n):223-230.
- Farfan, F. (2014). *Agroforestería y Sistemas Agroforestales con Café*. Manizales, Caldas (Colombia). 342 p.
- Hoyos, J. (1992). *Árboles tropicales ornamentales cultivados en Venezuela*. Sociedad de Ciencias Naturales La Salle. Caracas.
- Lara, L. (2005). *Efectos de la altitud, sombra, producción y fertilización sobre la calidad del café (Coffea arabica L. var. caturra) producido en sistemas agroforestales de la zona cafetalera norcentral de Nicaragua*. Tesis para optar el grado de Magíster Scientiae en agroforestería tropicales, CATIE, Costa Rica. 179 p.
- Leakey, R. (1997). *Reconsiderando la definición de Agroforestería*. *Agroforestería en las Américas*. 4 (16): 22-24.
- Lin, B.B. (2010). *The role of agroforestry in reducing water loss through soil evaporation and crop transpiration in coffee agroecosystems*. *Agricultural and Forest Meteorology* 150(4): 510-518.
- Llanco, J (2014). *Tipología de manejo agronómico en el crecimiento, productividad y calidad física de café (Coffea arabica var. Catimor) en el valle de Santa Cruz, distrito de Río Tambo, provincia de Satipo y región Junín*. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Centro del Perú. 74 p.
- López, E., y Miñano, F. (2002). *Métodos rápidos de análisis de suelos*. Madrid, España.
- López, G. (1992). *Sistemas Agroforestales*. Colegio de Postgraduados - Campus Puebla, Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, Estados Unidos Mexicanos. Cartilla. 8 p.

- Mayz-Figueroa J. (2004). *Fijación biológica de nitrógeno*. Universidad de Oriente, Núcleo de Monagas, Laboratorio de Rizobiología, Campus Juanico, Maturín, Estado Monagas – Venezuela. 22 p.
- Mollinedo, L. Alvarado A., Verjans, J., Rudy, C. (2005). *Relación suelo-árbol y factores de sitio, en plantaciones jóvenes de teca (Tectona grandis), en la zona oeste de la cuenca del canal de Panamá, CATIE*. Apartado postal 7171, Turrialba, Costa Rica, Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica. San José Costa Rica. \*\*\* ECOFOREST. Apartado postal 32 Balboa, Ancón. Panamá, Panamá. 10 p.
- Nygren, P. (1995). *Carbon and nitrogen dynamics in Erythrina poeppigiana (leguminosae: phaseoleae) trees managed by periodic prunings*. Doctoral thesis in Agricultural and Forestry, University of Helsinki, Department of Forest Ecology. 51 p.
- Novoa, O. (1992). *Crecimiento inicial de guaba caite (Inga densiflora benth), guaba chililillo (Inga edulis mart) y guaba machete (Inga spectabilis en dos sitios en Costa Rica)*. CATIE, Turrialba, Costa Rica.
- ONF (Oficina Nacional Forestal). (2013). *Guía Técnica Sistemas Agroforestales (SAF)*. Costa Rica: Euro Digital Comunicaciones.
- Paredes, M. C. (2013). *Fijación biológica de nitrógeno en leguminosas y gramíneas*. Trabajo Final de Ingeniería en Producción Agropecuaria. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Católica Argentina.  
<http://bibliotecadigital.uca.edu.ar/repositorio/tesis/fijacion-biologica-nitrogeno-leguminosas.pdf>
- Pennington, T. (1998). *Growth and biomass of Inga species*, p. 15-28. In: T. Pennington and E. Fernandez (eds.). *The genus Inga: Utilization*. Royal Botanic Gardens, Kew, UK.
- Pérez, Esther; Suárez. (2011). *Evaluación del efecto sombra en la producción de café – Coffea arabica L. - dentro de un sistema agroforestal tradicional con árboles en Las Minas, El Paraíso, Honduras*. Carrera de desarrollo socioeconómico y ambiente, escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Honduras.
- Instituto del Café de Costa Rica (2011). *Centro de Investigaciones en Café CICAFFE Guía Técnica para el Cultivo del Café*. Barva - Heredia Costa Rica. 63 p.

- Mendieta López, M., Rocha Molina, L. (2007). *Sistemas Agroforestales*. Universidad Nacional Agraria, Managua Nicaragua. 117 p.
- Muschler, R.G. (1997). *Efectos de sombra de Erythrina poeppigiana sobre Coffea arabica vars. Caturra y Catimor. Memorias del XVIII Simposium Latinoamericano de Cafecultura, September 1997*. San José, Costa Rica, IICA. pp. 157–162.
- Harrison, J. A. (2008). *Ciclo del nitrógeno*. De Microbios y de Hombres. [www.visionlearning.com/es/library/Ciencias-de-la-Tierra/6/El-Ciclo-del-Nitrógeno](http://www.visionlearning.com/es/library/Ciencias-de-la-Tierra/6/El-Ciclo-del-Nitrógeno)
- Thériez, M. (2015). *Los efectos de la sombra sobre la energía cinética de las gotas de agua, la cobertura del suelo, la infiltración del agua, la roya y el dieback en Turrialba*. Costa Rica. Turrialba, Costa Rica. Informe de pasantía voluntaria. CIRAD. 32 p.
- Rapidel, B.; Allinne, C.; Cerdan, C.; Meylan L.; Virginio Filho E.D.M.; Avelino J. (2015). *In: Montagnini F.; Somarriba E.; Murgueitio E.; Fassola H.; Eibl B. (Eds.). Sistemas Agroforestales: Funciones Productivas, Socioeconómicas y Ambientales. Colombia: CATIE*. p. 5-20. (Serie técnica. Informe técnico CATIE. 402 p.
- Sadzawka, A. (2003). *Que es el pH del suelo*. Revista Tierra adentro, Cali – Colombia. 8 p.
- Suclupe, E. (2007). *El Bosque de Huamantanga (Jaén). Una experiencia de gestión compartida de áreas de conservación municipal*. Proyecto: Bosques del Chinchipe. CI-ITDG. Perú. 32 p.
- Vaca Marquina, S. (2003). *Impacto de la Tala Selectiva en los Bosques de Podocarpus de San Ignacio – Cajamarca- Perú*. Lyonia, 5(2), 143-156. [https://lyonia.org/Archives/Lyonia%205\(2\)%202003\(101-212\)/Vaca%20Marquina,%20S.%3B%20Lyonia%205\(2\)%202003\(143-156\).pdf](https://lyonia.org/Archives/Lyonia%205(2)%202003(101-212)/Vaca%20Marquina,%20S.%3B%20Lyonia%205(2)%202003(143-156).pdf)
- Vásquez, J. D. (2013). *Relaciones alométricas del diámetro, altura y copa de especies arbóreas según su tolerancia a la sombra y sus estratos verticales en Tamshiyacu, Loreto, Perú*. Tesis de grado, para Ingeniero Forestal, Universidad de la Amazonía Peruana. Iquitos – Perú. 90 p.
- Vela, J. (2011). *Efecto de las diferentes profundidades de remoción del suelo e incorporación de biomasa vegetal en el crecimiento de guaba (Inga edulis Mart.) en*

*suelos degradados (ex cicales) de Supte San Jorge, Tingo María.* Tesis Para optar el Título de Ingeniero en Recursos Naturales Renovables mención Forestales, Universidad Agraria de la Selva. 86 p.

Villarreyña, R. (2016). *Efecto de los árboles de sombra sobre el suelo, en sistemas agroforestales con café, incluyendo la fenología y fisiología de los cafetos.* CATIE, CIRAD, Conservación Internacional, Proyecto CASCADA, Costa Rica. 38 p.

Villatoro, M., Henríquez, C., Sancho, F. (2008). *Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial de pH, ca, CICE y P del suelo.* Agronomía Costarricense 32(1): 95-105. ISSN:0377-9424 / 2008. [www.mag.go.cr/revagr/inicio.htm](http://www.mag.go.cr/revagr/inicio.htm) [www.cia.ucr.ac.cr](http://www.cia.ucr.ac.cr)

## CAPÍTULO VII

### ANEXOS

#### Anexo 1. Certificación de la identificación botánica

<b>JOSÉ RICARDO CAMPOS DE LA CRUZ</b> <b>CONSULTOR BOTÁNICO</b> C. B. P. N° 3796 Tel: 017512863 RPM 963689079 Email: jocamdc@gmail.com		
<b>CERTIFICACIÓN DE IDENTIFICACION BOTÁNICA</b> <small>JOSÉ RICARDO CAMPOS DE LA CRUZ, BIÓLOGO COLEGIADO- N° 3796 – INSCRITO CON EL N° 36 EN EL REGISTRO DE PROFESIONALES QUE REALIZAN CERTIFICACIÓN DE IDENTIFICACIÓN TAXONÓMICA DE ESPECÍMENES Y PRODUCTOS DE FLORA - RESOLUCIÓN DIRECTORAL N° 0311-2013- MINAGRI-DGFFS-DGEFFS.</small>		
<b>CERTIFICA:</b> Que, el Bachiller, OLMER NOE PEÑA CONTRERAS, egresado de la Facultad de Ciencias Agrarias, Escuela Académico Profesional de Ingeniería Forestal, de la Universidad Nacional de Cajamarca – sede Jaén, con fines de investigación, para desarrollar su tesis y optar el Título Profesional de Ingeniero Forestal, ha solicitado la identificación y certificación botánica de plantas de pacaec colectadas en el distrito de Chirinos, provincia de San Ignacio, departamento de Cajamarca; las muestras han sido estudiadas e identificadas como <i>Inga densiflora</i> Benth. Según el Sistema de clasificación APG, sistema moderno de clasificación de las angiospermas publicado en 1998 por el Grupo para la Filogenia de las Angiospermas, revisado por APG II (2003), APG III (2009) y APG IV (2016) comparado con el Sistema Integrado de Clasificación de las Angiospermas de Arthur Cronquist. (1981), ocupa las siguientes categorías taxonómicas.		
CATEGORÍAS	SISTEMA APG-2016	SISTEMA CRONQUIST 1981
REINO	Plantae	Plantae
DIVISIÓN	Angiospermae	Magnoliophyta
CLASE	Equisetopsida	Magnoliopsida
SUBCLASE	Magnoliidae	Rosidae
SUPERORDEN	Rosanae	.....
ORDEN	Fabales	Fabales
FAMILIA	Fabaceae	Fabaceae
GENERO	<i>Inga</i>	<i>Inga</i>
ESPECIE	<i>Inga densiflora</i> Benth	<i>Inga densiflora</i> Benth
Nombre vulgar: pacaec		
Se expide la presente certificación para fines de investigación científica.		
Lima, 25 de febrero del 2020		
 José R. Campos De La Cruz BIOLOGO C.B.P. 3796 		
Jr. Sánchez Silva 156 – 2do. Piso- Urbanización Santa Luzmila – Lima 07		

## Anexo 2. Reporte de análisis de suelos - caracterización



**INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES**  
INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN AGRÍCOLA PARA EL DESARROLLO DE LA AMAZONÍA PERUANA  
CERTIFICADO INDECOPI N° 00072183

**LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS, FERTILIZANTES Y ALIMENTOS**

**REPORTE DE ANÁLISIS DE SUELOS - CARACTERIZACIÓN**

N° SOLICITUD : AS0163-19  
 SOLICITANTE : SEGUNDO VACA MARQUINA  
 PROCEDENCIA : CAJAMARCA- SAN IGNACIO - CHIRINOS  
 CULTIVO : CAFÉ

FECHA DE MUESTREO : 16/11/2019  
 FECHA DE RECEP. LAB : 27/11/2019  
 FECHA DE REPORTE : 29/11/2019

Item	Número de la muestra				pH	C.E dS/m	CaCO <sub>3</sub> (%)	M.O (%)	N (%)	P (ppm)	K (ppm)	ANÁLISIS MECÁNICO			CIC pH 7.0	CATIONES CAMBIABLES					Suma de bases	% Sat. de bases	% Sat. de Al <sup>13</sup>	
	Lab.	Campo										Arena	Limo	Arcilla		CLASE TEXTURAL	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>				Al <sup>3+</sup> +H <sup>+</sup>
01	19	11	1405	I-1	7.22	0.10	0.13	3.13	0.14	3.65	261	24.24	23.28	52.48	Arc	13.76	11.16	1.93	0.67	0.00	0.00	13.76	100.0	0.0
02	19	11	1406	I-2	6.86	0.13	<0.1	2.76	0.12	3.08	168	22.24	23.28	54.48	Arc	14.07	11.48	2.16	0.43	0.00	0.00	14.07	100.0	0.0
03	19	11	1407	I-3	6.71	0.13	<0.1	3.98	0.18	4.81	76	24.24	23.28	52.48	Arc	17.57	15.15	2.23	0.19	0.00	0.00	17.57	100.0	0.0
04	19	11	1408	II-1	6.62	0.06	<0.1	2.76	0.12	2.31	296	24.24	19.28	56.48	Arc	9.98	7.05	2.18	0.76	0.00	0.00	9.98	100.0	0.0
05	19	11	1409	II-2	6.62	0.05	<0.1	2.58	0.12	3.08	560	30.24	15.28	54.48	Arc	17.37	13.10	2.84	1.43	0.00	0.00	17.37	100.0	0.0
06	19	11	1410	II-3	6.49	0.08	<0.1	3.36	0.15	4.62	480	26.24	21.28	52.48	Arc	12.37	8.88	2.27	1.23	0.00	0.00	12.37	100.0	0.0
07	19	11	1411	III-1	6.19	0.05	<0.1	3.04	0.14	4.23	240	30.24	15.28	54.48	Arc	13.22	5.70	1.46	0.61	0.00	0.00	7.78	58.9	0.0
08	19	11	1412	III-2	5.77	0.07	<0.1	3.68	0.17	0.58	213	18.24	19.28	62.48	Arc	15.45	6.27	1.88	0.55	0.00	0.00	8.69	56.3	0.0
09	19	11	1413	III-3	5.36	0.09	<0.1	4.20	0.19	5.00	262	24.24	15.28	60.48	Arc	27.50	16.81	2.75	0.67	0.00	2.21	20.22	73.5	9.9
10	19	11	1414	IV-1	5.67	0.22	<0.1	4.63	0.21	17.69	100	20.24	31.28	48.48	Arc	25.24	20.68	3.28	0.26	0.00	0.00	24.22	96.0	0.0
11	19	11	1415	IV-2	6.07	0.28	<0.1	7.85	0.35	8.65	81	22.24	29.28	48.48	Arc	9.91	7.69	2.02	0.21	0.00	0.00	9.91	100.0	0.0
12	19	11	1416	IV-3	5.46	0.07	<0.1	3.59	0.16	2.50	207	22.24	19.28	58.48	Arc	14.35	5.85	1.50	0.53	0.00	1.94	7.87	54.9	19.8

**MÉTODOS:**

TEXTURA	: HIDROMETRO
pH	: POTENCIOMETRO - SUSPENSION SUELO-AGUA RELACION 1:2.5
CONDUC. ELECTRICA	: CONDUCTIMETRO - SUSPENSION SUELO-AGUA 1:2.5
CARBONATOS	: GAS - VOLUMETRICO
FOSFORO DISPONIBLE	: OLSEN MODIFICADO EXTRACT. NaHCO <sub>3</sub> +0.5M , pH 8.5 Esp. Vs
POTASIO Y SODIO INTERCAMBIABLE	: (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> -COOH+1N , pH 7. Absorcion Atomica
MATERIA ORGANICA	: WALKLEY y BLACK
CALCIO Y MAGNESIO INTERCAMBIABLE	: EXTRACT. EDTA+1N ó (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> -COOH+1N , pH 7. Absorcion Atomica
ACIDEZ INTERC.	: EXTRACT. KCl 1N. VOLUMETRIA
ACIDEZ POTENCIAL	: WOODRUFF MODIFICADO
CIC pH 7.0	: ACIDEZ POTENCIAL+SUMA DE BASES
Fe, Cu, Zn y Mn	: OLSEN Modificado extra: NaHCO <sub>3</sub> +0.5M , pH 8.5 Absorcion Atomica
BORO	: Extracción / Espectrometria UV-Vis (λ=555 nm)
AZUFRE	: Extracción / Turbidimetria (λ=420 nm)
METALES PESADOS	: EPA 3050B

La Banda de Shilcayo, 29 de Noviembre del 2019

**INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES**  
**TARAPOTO - PERU**

*Cesar O. Arévalo Hernández, MSc*  
**JEFE DE DPTO. DE SUELOS**

Nota: El laboratorio no se responsabiliza por la metodología aplicada para la toma de la muestra del presente reporte.

Anexo 3. Tabla de interpretación de análisis de suelos

<p style="text-align: center;"><b>INSTITUTO DE CULTIVOS TROPICALES</b> <b>ANALISIS DE SUELOS</b></p> <p style="text-align: center;"><b>TABLA DE INTERPRETACION DE ANALISIS DE SUELOS</b></p>						
SALINIDAD		Materia Orgánica			Fósforo disponible	Potasio disponible
Clasificación	C.E (mS/cm)	Clasificación	%	ppm P	ppm K	Clasificación
* No salino	< 2	* Bajo	< 2	< 7.0	< 100	* Normal
* Ligeramente salino	2 - 4	* Medio	2 - 4	7.0 - 14.0	100 - 240	*Def. Mg
* Medianamente salino	4 - 8	* Alto	> 4	> 14.0	> 240	*Def. K
*Fuertemente salino	8 - 16					*Def. Mg
* Extremadamente salino	> 16					
Equiv. : 1 mS/cm = 1 dS/m = 1 mmhos/cm						
Reacción o pH		CLASES TEXTURALES			Distribución de Cationes %	
Clasificación	pH					
* Fuertemente ácido	< 5.5	Are = Arena	Fra - Arc- Are = Franco Arcillo Arenoso	Ca2+	=	60 - 75
* Moderadamente ácido	5.6 - 6.0	Are - Fra = Arena Franca	Fra - Arc = Franco Arcilloso	Mg2+	=	15 - 20
* Ligeramente ácido	6.1 - 6.99	Fra - Are = Franco Arenoso	Fra - Arc - Lim = Franco Arcillo Limoso	K+	=	3 - 7
* Neutro	7.0	Fra = Franco	Arc - Are = Arcillo Arenoso	Na+	=	< 15
* Ligeramente alcalino	7.01 - 7.8	Fra - Lim = Franco Limoso	Arc - Lim = Arcillo Limoso			
* Moderadamente alcalino	7.9 - 8.4	Lim = Limoso	Arc = Arcilloso			
* Fuertemente alcalino	> 8.5					

#### Anexo 4. Panel fotográfico



Fotos 1. Medición de altura de árboles



Fotos 2. Medición del DAP de árboles



Fotos 3. Ubicación de los puntos para el muestreo de suelo



Fotos 4. Medición de calicata para muestreo de suelo



Fotos 5. Vista fustal de árboles de *Inga densiflora* Benth en la parcela



Fotos 6. Vista de las ramas de los árboles de *Inga densiflora* Benth en la parcela