

**PRODUCCIÓN DE MATERIA SECA Y CONTENIDOS NUTRICIONALES EN CUATRO  
ESPECIES FORRAJERAS, BAJO TRES POTENCIALES MATRICIALES DE AGUA Y  
DOS LOCALIZACIONES DE FÓSFORO**

**NOÉ ALBÁN LÓPEZ**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS  
MAESTRÍA EN CIENCIAS AGRARIAS CON ÉNFASIS EN PRODUCCIÓN DE  
CULTIVOS  
SAN JUAN DE PASTO  
2018**

**PRODUCCIÓN DE MATERIA SECA Y CONTENIDOS NUTRICIONALES EN CUATRO  
ESPECIES FORRAJERAS, BAJO TRES POTENCIALES MATRICIALES DE AGUA Y  
DOS LOCALIZACIONES DE FÓSFORO**

**NOÉ ALBÁN LÓPEZ**

**Trabajo de grado en la modalidad de Investigación para optar al título de Magíster  
en Ciencias Agrarias con Énfasis en Producción de Cultivos**

**Director**

**Ph. D. MARCO HUGO RUÍZ ERAZO**

**Co Director**

**M. Sc. FABIO ALONSO PRADO CERÓN**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS  
MAESTRÍA EN CIENCIAS AGRARIAS CON ÉNFASIS EN PRODUCCIÓN DE  
CULTIVOS  
SAN JUAN DE PASTO  
2018**

## **NOTA DE RESPONSABILIDAD**

Las ideas y conclusiones aportadas en este Trabajo de Grado son Responsabilidad de los autores.

Artículo 1 del Acuerdo No. 324 de octubre 11 de 1966, emanado por el Honorable Concejo Directivo de la Universidad de Nariño.

## **Página de aceptación**

Los Directores y los Jurados han leído el presente documento, escucharon la sustentación del mismo por su autor y lo encuentran satisfactorio.

---

**Ph. D. MARCO HUGO RUÍZ ERAZO**  
Director

---

**M. Sc. FABIO ALONSO PRADO CERÓN**  
Co Director

---

**Ph. D. HERNÁN BURBANO ORJUELA**  
Jurado Delegado

---

**Ph. D. JORGE ALBERTO VELEZ LOZANO**  
Jurado

---

**Ph. D. JESÚS CASTILLO FRANCO**  
Jurado

San Juan de Pasto, 12 de enero de 2018

## RESUMEN

Dada la importancia del fósforo en la fase de establecimiento de las pasturas se planteó esta investigación con el objetivo de evaluar la “Producción de materia seca y contenidos nutricionales en cuatro especies forrajeras, bajo tres potenciales matriciales de agua y dos localizaciones de fósforo

El presente trabajo se desarrolló en el invernadero ubicado en la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad del Cauca, municipio de Popayán; los forrajes fueron sembrados en materas plásticas, donde se instaló un tensiómetro para controlar la humedad del suelo en tres potenciales matriciales: -15, -30 y -50 kPa. Se midieron periódicamente variables agronómicas: altura, vigor, cobertura, producción de materia seca (MS) según el forraje verde (FV) e índice de área foliar (IAF); los datos se analizaron estadísticamente utilizando el software SPSS versión 19.0, de IBM.

Según el análisis bromatológico la EUP y CUB, se determinó que el fósforo en raíces es mayor a medida que la humedad del suelo disminuye; en cambio, la concentración de fósforo en la parte aérea aumentó directamente en presencia de mayor humedad del suelo, al igual que la utilización de algunos nutrientes como potasio, calcio, magnesio y hierro, a excepción del boro, que fue absorbido en cantidades iguales en los tres potenciales matriciales.

De los resultados se concluye que la especie con mejor comportamiento fue *Brachiaria brizantha* (Toledo CIAT 26110), con fósforo uniformemente distribuido (PUD) en la fase de establecimiento en condiciones críticas de sequía a -50 kPa.

**Palabras clave:** Déficit Hídrico, Desertización, Nutrición.

## ABSTRACT

Given the importance of the phosphorus in pasture establishment phase it was this research was proposed with the objective of evaluating of Production of dry matter and nutritional contents in four forage species, under three matricial water potentials and two phosphorus locations.

The present work was realized under glasshouse located in the agricultural sciences faculty of the University of Cauca, municipality of Popayán, the feeding were planted in plastic receptacle, where it installed a tensiometer to control the humidity of the soil in three matricial potentials -15, -30 y -50 kPa, were evaluated recurrently agronomic variables: height, vigor, coverage, green production forage, dry matter (DM), leaf area index (LAI), the data was analyzed using the software statistic SPSS version 19.0. of IBM.

According to the bromatology analysis the PUE and BUC were determined that the phosphorus in roots is higher when the humidity of soil decrease, in contrast with the phosphorus concentration in the aerial part is higher directly in presence of higher humidity of soil in the same utilization of few nutriments like potassium, calcium, magnesium and iron. To exception of the boron that were absorbed in equal quantity in the three matricials potentials.

From the results it is concluded that the species with the best behavior was *Brachiaria brizantha* (Toledo CIAT 26110), with uniformly distributed phosphorus (PUD) in the establishment phase under critical conditions of drought at -50 kPa.

**Keywords:** Water Deficit, Desertification, Nutrition.

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. MARCO REFERENCIAL	16
1.1 GENERALIDADES	16
1.2 SUELO EN ESTUDIO	17
1.3 FÓSFORO EN LOS SUELOS	18
1.4 POTENCIAL MATRICIAL DE AGUA EN EL SUELO	19
1.4.1 Estrés hídrico	19
1.5 ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR	19
1.5.1 Índice de área foliar crítico	20
1.6 EFICIENCIA EN LA ABSORCIÓN DE FÓSFORO	20
1.7 EFICIENCIA DE UTILIZACIÓN DE NUTRIENTES (EUN)	20
1.8 COEFICIENTE DE UTILIZACIÓN BIOLÓGICA (CUB)	21
1.9 ADAPTACIÓN DE LOS PASTOS EN COLOMBIA	21
1.10 <i>Brachiaria</i> híbrido ( <i>B. híbrido</i> cv. Mulato II. CIAT 36087)	22
1.10.1 Botánica	22
1.10.2 Establecimiento	22
1.10.3 Adaptación	22
1.10.4 Rendimiento	22
1.10.5 Composición nutricional	23
1.11 <i>Brachiaria</i> híbrido ( <i>B. híbrido</i> cv. Caymán. CIAT BR02/1752)	23
1.11.1 Botánica	23
1.11.2 Establecimiento	23

1.11.3 Adaptación	23
1.11.4 Rendimiento	23
1.11.5 Composición Nutricional	24
1.12 <i>Brachiaria brizantha</i> ( <i>Brachiaria</i> cv.Toledo CIAT 26110)	24
1.12.1 Botánica	24
1.12.2 Establecimiento	24
1.12.3 Adaptación	24
1.12.4 Rendimiento	24
1.12.5 Composición nutricional	25
1.13 <i>Megathyrsus maximus</i> (cv. Mombasa CIAT 6962)	25
1.13.1 Botánica	25
1.13.2 Establecimiento	25
1.13.3 Adaptación	25
1.13.4 Rendimiento	25
1.13.5 Composición nutricional	25
2. METODOLOGÍA	26
2.1 LOCALIZACIÓN	26
2.2 OBTENCIÓN DEL SUELO PARA EL ENSAYO	26
2.3 ADECUACIÓN DEL INVERNADERO	27
2.4 ADECUACIÓN DEL SUELO PARA EL ENSAYO	27
2.5 INCUBACIÓN DE FÓSFORO	27
2.5.1 Fósforo uniformemente distribuido (PUD)	28
2.5.2 Fósforo localizado (PL)	28

pág.



2.6	INSTALACIÓN DE LAS BASES MANOMÉTRICAS	29
2.7	REVISIÓN DE CÁPSULAS	30
2.8	DISEÑO EXPERIMENTAL	30
2.9	INSTALACIÓN DEL EXPERIMENTO	31
2.9.1	Descripción de los tensiómetros	31
2.10	INSTALACIÓN DE LOS TENSIÓMETROS	32
2.11	MEDICIÓN DEL POTENCIAL Y DETERMINACIÓN DEL AGUA A APLICAR	33
2.12	MEDICIÓN DE LA EVAPORACIÓN DIARIA	34
2.13	REGISTROS DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA	35
2.14	PROCEDIMIENTO PARA FERTILIZACIÓN	35
2.15	ESTABLECIMIENTO DE LAS GRAMÍNEAS	36
2.16	VARIABLES EVALUADAS	39
2.16.1	Vigor	39
2.16.2	Cobertura	40
2.16.3	Altura de plantas	40
2.16.4	Producción de forraje verde	40
2.16.5	Producción de materia seca	40
2.16.6	Índice de Área Foliar	40
2.17	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	40
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
3.1	CONDICIONES CLIMÁTICAS	41
3.1.1	Condiciones de temperatura y humedad en establecimiento	41
3.2	VARIABLES AGRONÓMICAS	41

3.2.1 Vigor	42
3.2.2 Cobertura	43
3.2.3 Altura	45
3.2.4 Índice de área foliar	46
3.2.5 Materia seca	49
3.2.6 Eficiencia de utilización de fósforo	50
3.3 EFICIENCIA DE UTILIZACIÓN DE NUTRIENTES (EUN) Y COEFICIENTE DE UTILIZACIÓN BIOLÓGICA (CUB)	51
3.3.1 Nitrógeno	52
3.3.2 Potasio	52
3.3.3 Calcio	53
3.3.4 Magnesio	54
3.3.5 Boro	55
3.4 CORRELACIONES	56
4. CONCLUSIONES	58
BIBLIOGRAFÍA	59
ANEXOS	66

## LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Tratamientos	31
Cuadro 2. Reactivos y cantidades aplicadas	35
Cuadro 3. Cuadrado medio (CM) del análisis de varianza para las variables: Vigor (V.), Cobertura (Cov.), Altura (Alt.); Índice de área foliar (IAF); Rendimiento materia seca (RMS)	42
Cuadro 4. Correlaciones de Pearson	56

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Localización	26
Figura 2. Pesaje de fósforo	28
Figura 3. Fósforo uniformemente distribuido (PUD)	28
Figura 4. Bolsas incubando el fósforo localizado (PL) y distribuido (PUD)	29
Figura 5. A) Base instalada con ocho materas y ocho cápsulas; B) Lectura de Hg en los capilares de la base manométrica	30
Figura 6. Ubicación de los tratamientos	31
Figura 7. Cápsula semiporosa de porcelana	32
Figura 8. Instalación de las bases manométricas	33
Figura 9. Bases manométricas con las materas	33
Figura 10. Curva de retención de humedad	34
Figura 11. Registro diario de temperatura y humedad relativa	35
Figura 12. Pesaje de los reactivos para fertilizar	36
Figura 13. Siembra de las plantas	37
Figura 14. Fertilización a los 20 días	37
Figura 15. Corte, pesaje y embalaje de muestras de los forrajes	38
Figura 16. A) Análisis mediante NIRS; B) Medición de área foliar	38
Figura 17. A) Extracción. B) Lavado, C) Pesaje embalaje D) Secado de raíces	39
Figura 18. Toma de las muestras de suelo	39
Figura 19. Gráfica de temperatura y humedad relativa durante la investigación	41
Figura 20. Diagrama de barras para la variable vigor	42
Figura 21. Diagrama de barras para la variable cobertura (%)	45
Figura 22. Diagrama de barras para la variable altura	46

	pág.
Figura 23. Diagrama de barras para la variable Índice de área foliar (IAF)	47
Figura 24. Diagrama de barras para la variable materia seca	49
Figura 25. Diagrama de barras para fósforo	50
Figura 26. Diagrama de barras para nitrógeno	52
Figura 27. Diagrama de barras para potasio	53
Figura 28. Diagrama de barras para calcio	54
Figura 29. Diagrama de barras para magnesio	54
Figura 30. Diagrama de barras para boro	55

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Forraje verde	66
Anexo B. ANOVA para vigor	67
Anexo C. ANOVA para cobertura	68
Anexo D. ANOVA para altura	69
Anexo E. ANOVA para Índice Área foliar	70
Anexo F. ANOVA para Materia seca (MS)	72
Anexo G. Análisis de suelo inicial	73
Anexo H. Análisis de suelo final	74
Anexo I. ANOVA Nutrientes	75
Anexo J. Tabla Nutrientes CUB	76
Anexo K. Curvas suelos Patía	77
Anexo L. Cálculo alturas de columna	80

## GLOSARIO

**CAPACIDAD DE CAMPO O CAPACIDAD DE RETENCIÓN:** es la máxima cantidad de agua que un suelo puede retener o almacenar, bajo condiciones de humedecimiento total, seguido de drenaje libre o gravitacional.

**COEFICIENTE DE UTILIZACIÓN BIOLÓGICA (CUB):** herramienta matemática para calcular la eficiencia nutricional de la planta.

**CURVA DE RETENCIÓN DE HUMEDAD:** valores de energía contenida en un volumen de agua retenido por el suelo, cuando se desea precisar la cantidad de agua aprovechable en el suelo para la parte agrícola.

**EFICIENCIA DE UTILIZACIÓN DE FÓSFORO (EUP):** se refiere a la habilidad que tienen las plantas de tomar fósforo por unidad de longitud de raíz.

**EFICIENCIA DE UTILIZACIÓN DE NUTRIENTES (EUN):** en un sistema de producción vegetal, se refiere a la eficiencia de las plantas en el uso de los nutrientes en el corto o largo plazo, según el rendimiento, recuperación o remoción.

**ESTRÉS HÍDRICO:** respuesta de las plantas a un ambiente escaso de agua.

**ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR (IAF):** es el área total de la superficie superior de las hojas por área de unidad de terreno que se encuentre directamente debajo de la planta.

**POTENCIAL MÁTRICO:** mecanismo de retención del agua en el suelo, cohesión y adhesión.

**PUNTO DE MARCHITEZ:** es el estado particular en que el agua es retenida por el suelo, con una fuerza superior a la succión de las plantas y en el límite inferior de humedad aprovechable para las plantas.

**SUELOS HAPLUSTOLLS:** corresponden al orden molisol, se han originado a partir de rocas ígneas, que alternan con materiales sedimentarios (tobas y areniscas); son superficiales a moderadamente profundos, limitados por la presencia de rocas, horizontes argílicos, duros y compactos; el drenaje natural es moderado a bien drenado, fertilidad natural moderada. La mayoría presentan erosión hídrica laminar y problemas de compactación.

**TENSIÓMETRO:** mide la tensión del agua en campo y laboratorio, es una cápsula porosa de cerámica, conectada a un tubo o manguera llena de agua y a una cajuela de mercurio; este tensiómetro es más sensible y preciso que los de vacío.

## INTRODUCCIÓN

Colombia es un país que se caracteriza por tener una alta diversidad de especies vegetales que participan en la nutrición animal, como las gramíneas; a pesar de esta riqueza vegetal, la oferta forrajera se ha visto afectada por largos periodos de lluvias o de sequía y por la baja eficiencia en el uso de los nutrientes, en especial el fósforo (P) que es uno de los nutrientes más necesarios y que paradójicamente es de los más deficitarios para los cultivos. A pesar de un relativo alto contenido de P total en la mayoría de los suelos, el 98% tienen un inadecuado suplemento de P disponible para la nutrición de los cultivos, condición que induce deficiencias en distinto grado de severidad, con graves repercusiones en los niveles de productividad y rendimiento (Awasthi *et al.*, 2011). La disponibilidad del fósforo en los suelos objeto de este estudio, no es altamente asimilable por la planta, por esta razón es necesario aplicar fertilizantes inorgánicos.

En la actualidad, los sistemas de producción forrajera del Patía tienen pocas alternativas en cuanto a la alimentación bovina en época de sequía; como opción para dar solución a la problemática, la Universidad del Cauca se vincula con el grupo de Investigación Nutrición Agropecuaria NUTRIFACA, el Programa de Forrajes Tropicales del Centro Internacional de Agricultura Tropical CIAT, la Asociación de Ganaderos de Mercaderes ASOGAMER y la Cooperativa de Usuarios Campesinos del Patía COAGROUSUARIOS, para evaluar diferentes especies de gramíneas y así encontrar la que se adapte a las condiciones de sequía prolongada de esta región, ya que la ganadería es uno de los renglones económicos más importantes de la zona.

Para encontrar solución a esta problemática, se planteó esta investigación donde se evaluaron especies con buen rendimiento y tolerantes a periodos largos de sequía: *M. maximus* cv. *Mombasa*, *B. brizantha* cv. *Toledo*, *B. híbrido* cv. *Cayman* y *B. híbrido* cv. *Mulato II*, en suelo haplustoll, bajo condiciones de humedad controlada y dos localizaciones de fósforo, en forma localizada y uniformemente distribuida.

La investigación tuvo como objetivo general la determinación de la adaptación de cuatro variedades de gramíneas a diferentes contenidos de agua del suelo, para lo cual se debería determinar la producción y contenidos nutricionales en cuatro especies forrajeras, bajo tres potenciales matriciales de agua del suelo y dos localizaciones de fósforo, correlacionar los contenidos de nutrientes en el suelo y la planta a diferentes potenciales matriciales, y, determinar la eficiencia de utilización de nutrientes (EUN) y los coeficientes de utilización biológica (CUB) en las especies en estudio, bajo los diferentes potenciales matriciales.



## 1. MARCO REFERENCIAL

### 1.1 GENERALIDADES

Estudios de la Climate Action Network (CAN, 2008) sobre la eficacia de la utilización del agua, demuestran que el 70% de la superficie de la Tierra es agua, la mayor parte es oceánica y solo 3% es dulce, en su mayor parte no disponible. Solo el 1% es agua dulce superficial, fácilmente accesible y es primordialmente la que se encuentra en los ríos y lagos a poca profundidad del suelo, de donde puede extraerse sin mayor costo; al igual que el agua lluvia, es empleada en la producción y alimentación humana. Esta cantidad de agua utilizada se renueva habitualmente con la lluvia y las nevadas, y es considerado un recurso sostenible.

En los suelos habría entre un 20 y un 40% utilizable para las plantas; es por ello que el agua del suelo es tan importante para los ecosistemas terrestres. Desde el punto de vista agrícola, el suelo constituye la principal reserva de agua para el crecimiento de las plantas y es el almacenamiento regulador del ciclo hidrológico a nivel de cultivo (CAN, 2008).

El departamento del Cauca cuenta con recursos de agua provenientes de ríos, lagunas y quebradas; en el sur nacen cuatro de los grandes ríos que atraviesan el territorio nacional como son el Cauca, Magdalena, Caquetá y Patía; zonas como el municipio de Patía están sufriendo por la falta de agua, debido a la desecación de los ríos y la destrucción de ecosistemas, con la pérdida asociada de biodiversidad y medios de subsistencia (IGAC, 2009).

Según el reporte de la ENCUESTA NACIONAL AGROPECUARIA (ENA, 2012), el área utilizada para la actividad pecuaria de Colombia corresponde a un 80,3% del total, distribuida para la actividad agrícola con un 7,3%, área en bosques 10,3% y suelo a otros usos 2,1%. Así mismo, estimó que la actividad pecuaria se desarrolla en 30.362.322 ha, de donde un 56,6% es utilizada para pastos y forrajes, lo cual corresponde a 20.258.039 ha. La misma encuesta indica que el departamento del Cauca cuenta con un área de 29.308 km<sup>2</sup>, de los cuales 960.869 ha tienen uso pecuario dedicado a pastos y forrajes, maleza, rastrojo, vegetación de sabanas, páramos y xerofítica (ENA, 2012).

La región del Patía, ubicada en el trópico bajo, ha servido para adelantar estudios de investigación por parte del Centro Internacional de Agricultura Tropical CIAT y el grupo de investigación Nutrición Agropecuaria NUTRIFACA de la Universidad del Cauca, los cuales han encontrado materiales con importantes rendimientos que mejoran capacidad de carga, producción y economía para los pequeños productores. Según Peters *et al.* (2013), los cultivares *Brachiaria híbrido* Mulato II (CIAT 36087) y Cayman (CIAT BR02/1752) producen un 25% más de materia seca que otras *Brachiarias* comerciales, mientras que evaluaciones de *Megathyrsus maximus cv. Mombasa* (CIAT 6992) obtuvieron una producción hasta 30 t de ms/ha/año.

## 1.2 SUELO EN ESTUDIO

El valle del Patía presenta cambios pluviométricos notables, posee áreas secas y áreas lluviosas. Los factores que determinan la sequedad son de una parte la altitud que modifica la temperatura y por otra, los efectos orográficos que se producen al calentar el aire cálido y seco que pasa por la zona.

Las áreas secas corresponden a la zona ubicada entre los 500 y 1000 msnm, la temperatura varía entre los 22°C y los 24°C y tiene un promedio de precipitación de 1.800 mm; hay dos períodos definidos: uno de escasa precipitación de enero a agosto y otro de intensas lluvias de septiembre a diciembre. En algunos años, las sequías son tan fuertes que se convierte en una limitante para el desarrollo de pastos y cultivos. La mayor parte de la vegetación natural no existe en estas áreas, los bosques han sido talados para dar paso a actividades agropecuarias. Según el estudio de suelos del IGAC (2009), estos corresponden al orden Molisol que tienen un epipedon mólico y presentan un régimen de humedad ústico con una saturación de bases superior al 50% en todos sus horizontes hasta una profundidad de 180 cm. El paisaje corresponde a un clima seco y está dividido en dos grandes grupos: argiustolls y haplustolls.

Los suelos haplustoll se han originado a partir de rocas ígneas, que alternan con materiales sedimentarios (tobas y areniscas); son superficiales a moderadamente profundos, limitados por la presencia de rocas, horizontes argílicos, duros y compactos, el drenaje natural es moderado a bien drenados, texturas moderadamente gruesas a moderadamente finas, gravilosas, neutros a ligeramente ácidos y fertilidad natural moderada. La mayoría de los suelos presenta erosión hídrica laminar en grado moderado a severo y problemas de compactación de suelo que han dado origen a abundantes patas de vaca, terracetas y afloramientos rocosos (IGAC, 2009).

De acuerdo al IGAC (2009), la última clasificación del estudio de suelos realizados para uso agropecuario en el departamento del Cauca, clasifica los suelos de esta unidad cartográfica VWB, que se encuentra ubicada en jurisdicción de los municipios de Mercaderes, Patía y Bolívar, en alturas entre 700 y 1000 msnm. El clima es cálido seco con precipitaciones entre 1000 y 2000 mm y temperatura mayor a 24°C; corresponde a la zona de vida de bosque seco Tropical (bs-T).

La unidad ocupa la posición geomorfológica de vegas dentro del paisaje de valle aluvial y el relieve es plano con pendientes entre 1 y 3%. Los suelos se han desarrollado a partir de sedimentos aluviales moderadamente finos; son bien drenados, profundos a moderadamente profundos, texturas finas a medias, ligeramente ácidos a moderadamente alcalinos y fertilidad alta a muy alta. La vegetación natural está compuesta por rastrojos, donde predominan las especies de pelá, guásimo, yarumo, tunas, balso y vegetación de tipo espinoso; El uso actual de estas tierras es la ganadería extensiva y semi-intensiva, con pastos naturales y algunos introducidos como el puntero; la agricultura de subsistencia es poca.

En general, en el Valle del Patía la disponibilidad de forraje disminuye notablemente en los meses de septiembre y octubre. La mayor parte de los productores depende del uso de pasturas degradadas para el sostenimiento de los animales; estas pasturas representan un área significativa en las fincas y están compuestas principalmente por *Dichanthium aristatum* (Angleton), “gramas” (*Cynodon dactylon*), “Puntero” (*Hyparrhenia rufa*) y “Estrella” (*Cynodon nlemfluensis*) (Carrillo y Galíndez, 2014).

### 1.3 FÓSFORO EN LOS SUELOS

En el suelo existen fuentes de fósforo inorgánico y orgánico y su distribución depende de factores como el tipo de suelo, pH, tipo de vegetación, actividad microbiana y entradas de fertilizantes (Rooney *et al.*, 2009).

En los suelos la disponibilidad del fósforo es esencial, porque hace parte en el estado mineral que forma complejos fosforados con lípidos, prótidos y glúcidos. El fósforo es requerido para el crecimiento vegetal principalmente por tejidos jóvenes, porque constituye más de 0,2% del peso seco de la planta (Banerjee *et al.*, 2010).

El fósforo es un elemento mayor, de gran importancia para el óptimo desarrollo y producción de las plantas, debe ser suministrado en forma de fertilizantes fosforados en suelos con deficiencias de este elemento. El fósforo es un nutriente esencial para la planta, el cual está involucrado en un amplio rango de procesos que van desde permitir la división celular, hasta el sistema de un buen desarrollo de raíces (Rojas y Moreno, 2008).

El contenido de P en los suelos varía entre 200 y 5000 mg kg<sup>-1</sup>, con un promedio de 600 mg kg<sup>-1</sup> (Arai y Sparks, 2007; Sharpley, 2012), incluyendo formas inorgánicas (P<sub>i</sub>) y formas orgánicas de P (P<sub>o</sub>). En la mayoría de los suelos, el P<sub>i</sub> comprende el 50 al 70% del P total, aunque la fracción puede variar entre el 10 al 90%, dependiendo del tipo de suelo. En las rocas primarias y en los suelos jóvenes, el P se encuentra unido principalmente al Ca y Mg, dando al P una solubilidad típica que se estima entre 0,01 y 0,1 mg L<sup>-1</sup> (Sharpley, 2012); en los suelos altamente lavados, el P se une principalmente al Fe y Al, formando fosfatos de Fe (Fe-P) y de aluminio (Al-P), de solubilidad mucho más baja que la de los fosfatos de Ca (Ca-P) (Arai y Sparks, 2007; Sharpley, 2012; Tiessen, 2008).

En general, la movilidad y concentración del fósforo en los suelos es muy baja si se compara con la de otros nutrientes; así se presentan coeficientes de difusión del fosfato en el suelo de 0,3 a 3,3 x 10<sup>-13</sup> m<sup>2</sup>/s y su concentración en la solución del suelo es de 0,02 ppm. (Banerjee *et al.*, 2010). Por esta razón se hace necesaria la aplicación de fertilizantes fosforados, con el objetivo de suplir la alta demanda de este nutriente por parte de las plantas, que adquieren el fosfato a partir de la solución del suelo en forma inorgánica en estado soluble como fosfatos mono y dibásicos, siendo necesario un pH muy cercano a 6,5 para que el ion ortofosfato en el suelo sea aprovechable por las

plantas, dado que a ese pH, la precipitación de los fosfatos de aluminio y calcio es baja (Sylvia *et al.*, 1995).

El fósforo, después del nitrógeno, es el elemento más crítico para la producción agropecuaria, pero su disponibilidad es cada vez más limitada debido a la progresiva insuficiencia de sus fuentes naturales, su relativa escasez edáfica, elevada retención por parte de la matriz del suelo, la falta de reposición natural y su baja movilidad comparada con la de otros nutrientes (Rubio, 2002).

Los suelos typic haplustoll del Valle del Patía se caracterizan químicamente por presentar una reacción neutra a ligeramente alcalina, con muy alta saturación de bases, bajos en contenidos de carbono orgánico y muy pobres en fósforo aprovechable (POT, Alcaldía Patía, 2009).

## 1.4 POTENCIAL MATRICIAL DE AGUA EN EL SUELO

Denominado también potencial capilar o mátrico, es el trabajo que sería necesario para desplazar el agua en contra de las fuerzas capilares o para transformar un gramo de agua ligada en agua libre. Se expresa en centímetros de altura de una columna de agua necesaria para llevar el agua del suelo a la dosis de humedad precisa (Valenzuela y Torrente, 2013).

**1.4.1 Estrés hídrico.** Las plantas contienen una cierta cantidad de agua que actúa como un amortiguador contra los momentos de escases en el suelo, pero esta cantidad es muy pequeña y sirve para un periodo de corta duración. La falta de agua en el suelo disminuye la disponibilidad de los nutrientes, reduciendo la actividad microbiana, afectando la liberación de N, P y S de la materia orgánica (Valenzuela y Torrente, 2013).

Brito *et al.* (2014), estudiaron la Higuierilla (*Ricinus cummunis*) bajo invernadero cultivada en macetas y evaluaron el desarrollo y crecimiento a diferentes tensiones de agua en el suelo; los resultados mostraron que la higuierilla es sensible al aumento de la tensión de agua en el suelo y las condiciones de mayor estrés conducen a un crecimiento reducido con índices de transpiración y periodo vegetativo menores.

## 1.5 ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR

El índice de área foliar (IAF) es la relación entre la superficie de las hojas (una cara) y la superficie del suelo que las soporta. Este índice es óptimo en el límite entre un cultivo abierto y uno cerrado; si es bajo, una parte de la luz se pierde, pero si es alto, una parte de las hojas no están iluminadas (autosombreamiento), pero respiran y le hacen perder carbono a la planta.

Las coberturas de los cultivos muy rastreros, como el trébol blanco y el maní forrajero, se cierran para índices de área foliar próximos a 1 (1 m<sup>2</sup> de superficie de hojas por un 1 m<sup>2</sup> de superficie de terreno), pues una sola capa puede cubrir enteramente el suelo; las plantas erectas cierran en sus coberturas con valores de índice 3 o 4 (Sierra, 2005).

El área foliar (AF) alcanzada por una planta durante ciertos estadios específicos del desarrollo, es un dato indispensable para la calibración, adaptación y en general para la aplicación racional de los modelos de simulación agroambientales (Warnock, 2005).

**1.5.1 Índice de área foliar crítico.** El índice de área foliar crítico, es aquel valor de IAF que le permite a la planta interceptar más del 95% de la luz incidente en un día sin nubes, lo que le proporciona un crecimiento óptimo. El IAF<sub>C</sub> varía para cada especie: en el ray grass toma un valor de 7,5 y en el trébol blanco su valor es de 3,5 (Sierra, 2005). Cuando el IAF está por debajo de cierto nivel, no se utiliza toda la luz incidente o disponible y en consecuencia el crecimiento es lento. Con valores muy altos de IAF puede ocurrir un autosombreamiento de la planta, lo que también puede causar reducción en el potencial de crecimiento o de producción de materia seca por hectárea por año (Sierra, 2005).

## 1.6 EFICIENCIA EN LA ABSORCIÓN DE FÓSFORO

Según Bruulsema *et al.* (2004), citados por Stewart (2015), los conceptos de uso eficiente de nutrientes, generalmente describen a las plantas como un sistema de producción que usan los nutrientes con una eficiencia que puede verse a corto o largo plazo, y que puede basarse en el rendimiento, recuperación o remoción.

García (2008) manifiesta que en promedio, alrededor del 33% del total de nutriente aplicado es absorbido y metabolizado por las plantas. El uso eficiente de nutrientes ha tomado más relevancia con el incremento en los costos de fertilizantes y la preocupación por el impacto ambiental, especialmente por la calidad y cantidad del agua asociada con su uso inapropiado.

La eficiencia en la absorción del P se refiere a la habilidad que tienen las plantas en tomar cantidades de P por unidad de longitud de raíz (Rao, 2001), o, la habilidad que tienen los genotipos tolerantes de tomar P cuando se han sembrado en condiciones de bajo P (Schaffert *et al.*, 2002; Alves *et al.*, 2002), que se atribuye a adaptaciones morfológicas, fisiológicas y bioquímicas de las raíces (Abel *et al.*, 2002); morfológicamente van desde cambios en la estructura de la raíz, hasta modificaciones en la cantidad, densidad y longitud de las raíces laterales, adventicias y pelos radicales (Bates y Lynch, 2000).

## 1.7 EFICIENCIA DE UTILIZACIÓN DE NUTRIENTES (EUN)

A diferencia de Bruulsema *et al.* (2004) citado por Stewart (2015), que define el uso eficiente de nutrientes que puede basarse en el rendimiento, recuperación o remoción, la eficiencia agronómica según Dobermann (2007) es el número de kilos de incremento en rendimiento con base en la dosis del nutriente aplicado al cultivo.

$$EA = \frac{\textit{kilogramo de nutriente en rendimiento}}{\textit{kilogramo de nutriente aplicado}}$$

R: Rendimiento del cultivo con aplicación de nutrientes

Ro: Rendimiento de cultivo sin aplicación de nutriente

F: Dosis de nutriente

De acuerdo con García (2008), en promedio el 33% del total de nutriente aplicado es absorbido y metabolizado por las plantas. Si se incrementara el uso eficiente de nutrientes en 1%, se producirían cerca de 500 millones de toneladas más de alimentos, lo que significaría un ahorro aproximado de US\$ 235 millones. En general, lo que se busca es una menor pérdida de nutrientes en el campo, y eso significa un mayor uso eficiente de ellos.

## **1.8 COEFICIENTE DE UTILIZACIÓN BIOLÓGICA (CUB)**

A través del CUB se puede calcular la eficiencia nutricional de la planta, expresada en kg de materia seca producida por kg de nutriente acumulado (Freire *et al.*, 2013).

A través del CUB podemos conocer la eficiencia nutricional de la planta, dado que es la primera variable calculada hasta llegar a la recomendación final. Para llegar hasta el valor del CUB es necesario saber cuánto de nutriente la planta absorbió de la cantidad aplicada (TCH) (Méndes, 2006).

## **1.9 ADAPTACIÓN DE LOS PASTOS EN COLOMBIA**

Muchas áreas dedicadas a la ganadería en el país, se encuentran en zonas donde las condiciones reinantes son de altas precipitaciones y altas temperaturas, en presencia de topografías onduladas o pendientes y especies forrajeras que no brindan coberturas densas y protectoras, condiciones que hacen que estos ecosistemas sean muy frágiles y, a menudo, los procesos de degradación de las pasturas y de los suelos se encuentran muy avanzados, como en el caso de Patía y Mercaderes (IGAC, 2009).

Las gramíneas mejoradas constituyen aquellos forrajes seleccionados a propósito por sus características específicas. En este caso, el hombre tiene una intervención directa en su

siembra y en la aplicación de prácticas culturales tendientes a mejorar la producción y persistencia. Son plantas perennes en su mayoría, de altas producciones que responden favorablemente a la aplicación de prácticas agronómicas como fertilización y que además permiten aplicar ventajosamente la subdivisión de potreros y la aplicación de sistemas intensivos de pastoreo (IGAC, 2009).

En este sentido, el CIAT en los últimos años ha desarrollado especies forrajeras que se pueden adaptar a condiciones climáticas adversas. En los municipios de Patía y Mercaderes se ha venido trabajando con los productores para encontrar alternativas de producción y soluciones para los suelos degradados de estos municipios (Peters, 2011).

### **1.10 *Brachiaria* híbrido (*B. híbrido cv. Mulato II. CIAT 36087*).**

**1.10.1 Botánica.** Peters *et al.* (2011), determinaron que es una gramínea perenne de crecimiento semi-erecto que puede alcanzar hasta 1m de altura. Produce tallos cilíndricos, pubescentes y vigorosos, algunos con hábitos semi-decumbentes, capaces de enraizar cuando entran en contacto con el suelo, por efecto del pisoteo animal o por compactación mecánica, lo cual favorece el cubrimiento total del suelo en potreros bajo pastoreo. Las hojas son lineal-triangularadas (lanceoladas) con alta pubescencia en ambos lados, que miden alrededor de 3,8 cm de ancho y son de color verde intenso.

La inflorescencia es una panícula con cuatro a seis racimos con hilera doble de espiguillas, los cuales tienen unos 5 mm de largo y 2mm de ancho. Estas presentan durante la antesis estigmas de color blanco crema.

**1.10.2 Establecimiento.** Peters *et al.* (2011) afirman que se establece fácilmente por semilla y las plántulas crecen con excelente vigor, con coberturas superiores al 80% entre 90 y 120 días de la siembra; también se puede establecer con material vegetativo preferiblemente con cepas enraizadas. La siembra con semilla puede ser al voleo o en surcos separados entre 0,50 a 0,70m, en suelo preparado convencionalmente con arado y rastra. La siembra al voleo requiere tasas más altas, entre 5 a 6 kg/ha de semilla, con un mínimo del 60% del valor cultural, lo cual se deriva de una semilla de un 80% de pureza y 75% de germinación. Las siembras en surcos o a chuzos requieren una menor cantidad de semilla, alrededor de 4 a 5 kg/ha.

**1.10.3 Adaptación.** Según Peters *et al.* (2011), el pasto Mulato II tiene un rango amplio de adaptación, crece bien desde el nivel del mar hasta los 1800 msnm, en condiciones de trópico húmedo con altas precipitaciones y en condiciones subhúmedas con 5 a 6 meses secos. Requiere suelos con buen drenaje, pH de 3,8 a 7,5, precipitaciones mayores a 700 mm, se adapta bien a suelos de mediana a alta fertilidad.

**1.10.4 Rendimiento.** Peters *et al.* (2013) aseguran que este cultivar tiene buena adaptación a suelos ácidos de baja fertilidad con alto contenido de aluminio, como Oxisoles de los Llanos Orientales de Colombia. En Guápiles, Costa Rica reportan rendimientos de 2300 kg/ms/ha. Una de las características más deseables del cv. Mulato II es su tolerancia a períodos prolongados de sequía y su capacidad de rebrotar y ofrecer forraje verde durante esta época crítica del año.

Se estima que entre un 17% y 20% del forraje total producido por esta gramínea se da en el período seco, lo que depende obviamente de las características climáticas del sitio. Por esta razón la producción de forraje tiende a ser menos estacional que el de otros cultivares de *Brachiaria*. Lo anterior pareciera estar asociado con un desarrollo radicular profundo en la ausencia de Al y por tener el cv. Mulato II altos contenidos de carbohidratos no estructurales en hojas (152 mg/kg) y tallos (161 mg/kg), así como bajos niveles de ceniza en el tejido foliar (Betancur y Valencia, 2011).

**1.10.5 Composición nutricional.** La calidad forrajera de una gramínea, medida en términos de porcentaje de PC y digestibilidad in-vitro de la ms (DIVMS), está influenciada por la edad y la parte de la planta que se analice, la época del año y de condiciones de fertilidad del suelo. El cv. Mulato II ha mostrado adecuados contenidos minerales en suelos ácidos pobres fertilizados solo con nitrógeno. La DIVMS se encuentra entre 50 a 60% y Proteína cruda del 10 al 12%.

## **1.11 *Brachiaria* híbrido (*B.* híbrido cv. Caymán. CIAT BR02/1752).**

**1.11.1 Botánica.** Es una gramínea perenne de crecimiento decumbente, estolonífero y cespitoso. Los tallos son de color verde intenso con abundante pubescencia; las hojas son lanceoladas de color verde intenso de 15 a 20 cm de largo. Las plantas son vigorosas con buen macollamiento y la producción de semilla es relativamente baja.

**1.11.2 Establecimiento.** Peters *et al.* (2013) afirman que su rápido establecimiento se hace con semilla de 4-6 k/ha dependiendo de la calidad, o con material vegetativo preferiblemente con cepas enraizadas. La siembra puede ser al voleo o en surcos, en suelo preparado convencionalmente con arado y rastra.

El Caymán es un híbrido de *brachiaria* que tolera encharcamientos prolongados, requiere suelos de media a alta fertilidad; precipitación año de 700 – 1000 mm; rango de altitud de los 0 a 1500 msnm (Peters *et al.*, 2011).

**1.11.3 Adaptación.** Se adapta a suelos bien drenados de mediana fertilidad con pH mayor a 4,5; topografía plana a ondulada. Es resistente a sequías prolongadas, con buena producción de forraje en época crítica, más no tolera suelos mal drenados, presenta una mayor resistencia al ataque de salvazo que otras bachiarias mejoradas.



**1.11.4 Rendimiento.** Peters *et al.* (2013) anuncian que este híbrido produce 25% más de Materia seca (MS) que otras brachiarias comerciales como *B. decumbens*, *B. brizantha* cv. Toledo y *B. brizantha* cv. Marandú; generando hasta 25 t de ms/ha/año y elevando la producción animal de 1 a 2 k animal día.

**1.11.5 Composición Nutricional.** Es un pasto con alta palatabilidad. Se calcula la producción de forraje con proteína entre 12 y 15%, la digestibilidad de la ms entre 55 y 62%.

## **1.12 *Brachiaria brizantha* (*Brachiaria* cv.Toledo CIAT 26110).**

**1.12.1 Botánica.** Según Peters *et al.* (2011), el pasto Toledo derivó directamente de la accesión *B. brizantha* CIAT 26110; es una gramínea perenne que crece formando macollas y puede alcanzar hasta 1,60 m de altura. Produce tallos vigorosos capaces de enraizar a partir de los nudos cuando entran en estrecho contacto con el suelo, bien sea por el efecto del pisoteo animal o por compactación mecánica, lo cual favorece el cubrimiento y el desplazamiento lateral de la gramínea. Las hojas son lanceoladas con poca pubescencia y alcanzan hasta 60cm de longitud y 2,5cm de ancho. La inflorescencia es una panícula de 40 a 50cm de longitud, con cuatro racimos de 8 a 12cm y una sola hilera de espiguillas; sobre ella, cada tallo produce una o más inflorescencias provenientes de nudos diferentes, aunque la de mayor tamaño es la terminal.

**1.12.2 Establecimiento.** CIAT (2004) reporta que el pasto Toledo se establece por medio de semilla sexual; es necesario escarificar las semillas mecánica o químicamente antes de la siembra, la cual generalmente es de buena calidad dando como resultado plántulas con alto poder de desarrollo. En forma vegetativa, es necesario seleccionar cepas con raíces para alcanzar un mayor éxito. El establecimiento y la siembra puede ser al voleo o en surcos separados 0,5m sobre el terreno preparado convencionalmente con arado y rastrillo.

**1.12.3 Adaptación.** Según Peters y Franco (2003), para Colombia el pasto Toledo tiene un amplio rango de adaptación a climas y suelos. Crece bien en condiciones de trópico subhúmedo con períodos secos entre 5 y 6 meses, promedios de lluvia anual de 1600 mm y en localidades de trópico muy húmedos con precipitaciones anuales superiores a 3500 mm. Aunque se desarrolla bien en suelos ácidos de baja fertilidad, su mejor desempeño se ha observado en localidades con suelos de mediana a buena fertilidad. Tolerancia a suelos arenosos y persiste en suelos mal drenados, pero su crecimiento puede reducirse si se mantiene el encharcamiento por más de 30 días. Crece bien durante la época seca, manteniendo una mayor proporción de hojas verdes que otros cultivares de la misma especie como *B. brizantha* cv. Marandú y La libertad, y crece muy bien bajo sombra.

**1.12.4 Rendimiento.** Peters y Franco (2011), en evaluaciones realizadas en diferentes sitios de Colombia con fertilidad y clima contrastantes, reportaron que los promedios de producción de ms del pasto Toledo variaron entre 25 y 33 t de ms/ha/año, en cortes cada ocho semanas durante épocas secas y lluviosas.

**1.12.5 Composición nutricional.** Peters y Franco (2011) determinaron que este cultivar alcanza concentraciones de proteína cruda en las hojas de 13,10 y 8% a edades de rebrote de 25, 35 y 45 días respectivamente. En estas mismas edades, la digestibilidad in-vitro de la materia seca (DIVMS) fue de 67, 64 y 60%. Lo anterior indica que este cultivar tiene una buena calidad forrajera.

### **1.13 *Megathyrus maximus* (cv. Mombasa CIAT 6962).**

**1.13.1 Botánica.** Gramínea perenne de porte erecto originaria de África, crece en macollas con una altura promedio de 1,5 m, sus hojas son largas, anchas, toscas y de color verde oscuro. Este cultivar tiene como característica su alta tasa de rebrote y la mayor relación tallo-hoja. Según Estrada y Álvarez (2001), esta gramínea se describe como una planta productora de abundante floración. Las flores están en panículas bien desarrolladas, frecuentemente de más de 60 cm de longitud con numerosas semillas, de 3 a 6 mm de largo y 1 a 2 mm de ancho. El período de floración y producción de semilla se prolonga por un largo tiempo, dando origen a una maduración irregular en la panícula. Estas pequeñas semillas están recubiertas de glumas, las cuales son lisas y vellosas.

**1.13.2 Establecimiento.** Peters y Franco (2003), afirman que esta gramínea se establece preferiblemente por semilla sexual y ocasionalmente de forma vegetativa. Cuando se utiliza la semilla sexual, para su establecimiento la cantidad recomendada es de 6 kg/ha de semilla, pero depende del sistema de siembra y de su calidad (pureza, germinación, viabilidad). Se recomienda sembrar en líneas separadas de 0,7 m y a no más de 1 cm de profundidad, debido al tamaño de la semilla; la siembra al voleo requiere más semilla. Cubre rápidamente el suelo, tiene buena persistencia y productividad.

**1.13.3 Adaptación.** Crece en alturas desde el nivel del mar hasta los 1500 m, con precipitaciones superiores a 800 mm. Se adapta a un rango amplio de suelos, prefiere los suelos fértiles, soporta periodos largos de sequía y rebrota vigorosamente con las primeras lluvias con el periodo de sequía (Peters *et al.*, 2011).

**1.13.4 Rendimiento.** Tiene buena producción de forraje con alto contenido de hojas, alcanza rendimientos mayores a 25 t/ha/año, soporta encharcamientos temporales y tolera medianamente el frío y la quema.

**1.13.5 Composición nutricional.** Presenta alta calidad y palatabilidad, con contenidos altos de proteína cruda entre 10 y 14% y digestibilidad del 60 a 65%, dependiendo de la edad, suelo y condiciones climáticas. En sistemas de rotación se reportan producciones de 3 t de carne/ha/año y cargas de 4-5 animales ha/año (Peters *et al.*, 2013).

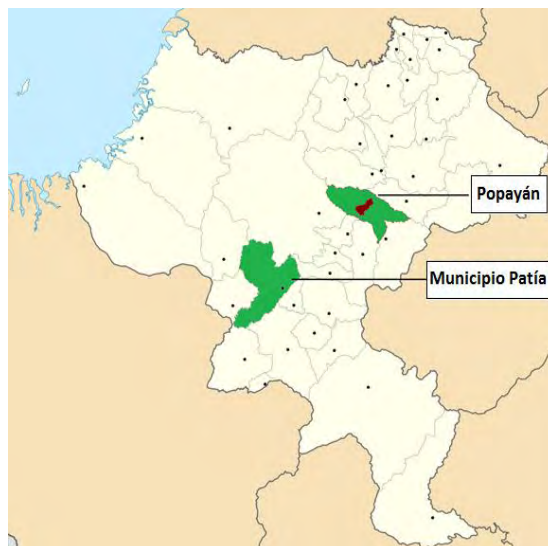
## 2. METODOLOGÍA

Durante la investigación se evaluó la adaptación de cuatro especies de gramíneas, *M. maximus* cv. *Mombasa*, *B. brizantha* cv. *Toledo*, *B. híbrido* cv. *Cayman* y *B. híbrido* cv. *Mulato II*, sembradas en un suelo proveniente del Valle del Patía y sometidas a diferentes niveles de suministro de agua, representados mediante los potenciales -15 kPa (saturación de agua), -30 kPa (capacidad de campo) y -50 kPa (restricción de agua), de acuerdo con la curva de retención de humedad del suelo utilizado; en total fueron 1.160 ml de agua, 180 ml de agua por 5 kg de suelo. La humedad del suelo se midió diariamente por medio de tensiómetros con cápsulas semiporosas de porcelana y bases manométricas, con el fin de calcular diariamente el agua a suministrar para mantener los potenciales.

### 2.1 LOCALIZACIÓN

La investigación se realizó en el invernadero de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad del Cauca, sede Las Guacas, ubicada en el municipio de Popayán, Departamento del Cauca. La ubicación del invernadero fue referenciada mediante GPS del grupo de investigación Nutrifaca dando las siguientes coordenadas: 2°28'14.104" latitud norte y 76°33'01.467" longitud oeste, a una altura de 1.897 msnm.

Figura 1. Localización



### 2.2 OBTENCIÓN DEL SUELO PARA EL ENSAYO

Para la toma de las muestras del suelo se identificó la zona en el Valle del Patía, caracterizado por tener vegas y terrazas bajas dentro de un relieve plano; la muestra se

tomó de la finca La Cocha, ubicada en el corregimiento de El Estrecho. El muestreo fue de 400 kg de los primeros 20 cm de suelo.

Según el IGAC (2009), el suelo utilizado es clasificado como haplustoll, que corresponde a suelos originados de aluviones, moderadamente profundos a muy superficiales, muy pobres a bien drenados, de texturas gruesas a medias, desde fuertemente ácidos a alcalinos de fertilidad alta a moderada y erosión severa. Las muestras de suelo de 1 kg fueron llevadas al laboratorio de suelos del Centro Internacional de Agricultura Tropical – CIAT, para ser caracterizadas física y químicamente. Además, se tomaron ocho muestras de suelo utilizando anillos concéntricos, para determinar la curva característica de agua del suelo y establecer los potenciales matriciales a trabajar con las especies de pastos seleccionados.

Con base en lo anterior, para el cumplimiento del objetivo específico “Determinar la producción y contenidos nutricionales en cuatro especies forrajeras, bajo tres potenciales de agua del suelo y dos localizaciones de fósforo”, se realizaron las siguientes actividades:

### **2.3 ADECUACIÓN DEL INVERNADERO**

Una vez conseguidos los equipos, materiales e insumos a través del Programa de Forrajes del CIAT, el Grupo de Investigación Nutrifaca y la asesoría del investigador Ph. D. Hugo Ruíz Erazo de la Facultad de Ingeniería Agronómica de la Universidad de Nariño, se adecuó el invernadero en un área de 27,6 m<sup>2</sup> y se cubrió en su totalidad con plástico calibre 6, para simular condiciones de temperaturas altas y suministro de agua. Para disponer las 72 materas, se adecuaron tres mesas construidas en guadua y tabla de un largo de 5,80m x 1,05m de ancho x 0,75m de alto, a las cuales se les instalaron los 9 tensiómetros, distribuidos según el diseño experimental.

### **2.4 ADECUACIÓN DEL SUELO PARA EL ENSAYO**

El suelo fue secado al sol durante 15 días y luego tamizado en mallas calibre 4mm, para estandarizar la partícula de suelo y obtener una muestra homogénea, como lo exige el protocolo ASTD 1979 para este tipo de estudios, quedando dispuesta para empezar el experimento. Los 5 k de cada uno de los 72 tratamientos, se incubaron con el fósforo y se dejaron por 30 días en bolsas plásticas, para luego ser pasadas a las materas.

### **2.5 INCUBACIÓN DE FÓSFORO**

Con los resultados del análisis de suelo se determinó la cantidad de fósforo (NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>H<sub>2</sub>O) requerido para incubar el suelo, de acuerdo a la técnica del elemento

faltante, método biológico utilizado en prácticas de laboratorio para evaluar su fertilidad. Se pesaron 570 g de fósforo en una balanza analítica en el Laboratorio de Biotecnología de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad del Cauca, para ser repartido en partes iguales en cada uno de los 72 tratamientos. A continuación se incorporaron 7,91 g de fósforo por bolsa de 5 k de suelo, repartidas así: 36 bolsas con fósforo uniformemente distribuido (PUD) y 36 bolsas con fósforo localizado (PL).

Figura 2. Pesaje de fósforo



**2.5.1 Fósforo uniformemente distribuido (PUD).** En una mesa del invernadero fueron vaciados los 5 k de suelo de las 36 bolsas que se repartieron previamente y cada una se dividió en 4 partes iguales; los 7,91 g de fósforo ( $\text{NaH}_2\text{PO}_4\text{H}_2\text{O}$ ) se mezclaron con el primer cuarto de suelo y posteriormente con cada uno de los tres restantes, para tener como resultado el PUD. Se empacó nuevamente y se aplicaron 1160 ml de agua por bolsa para llevar el suelo a capacidad de campo, de acuerdo al modelo matemático establecido; inmediatamente se selló cada bolsa y se dejó 30 días, para así finalizar la etapa de incubación.

Figura 3. Fósforo uniformemente distribuido (PUD)



**2.5.2 Fósforo localizado (PL).** Se tomaron los 5 k de suelo de cada una de las 36 bolsas restantes y separadas en 2 partes en una relación 70-30, que corresponde a 3,5 k (36 bolsas) y 1,5 k (36 bolsas) de suelo respectivamente. La porción del 30% equivalente a 1,5 k, se dividió en cuatro partes iguales y se incorporaron 7,91 g de fósforo

( $\text{NaH}_2\text{PO}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$ ), al igual que en el procedimiento anterior, se mezcló con el primer cuarto de suelo y posteriormente con cada uno de los tres restantes, para tener como resultado el PL. Se empacó nuevamente y se aplicaron 348 ml de agua por bolsa para llevar el suelo a capacidad de campo de acuerdo al modelo matemático establecido, se selló cada bolsa y se dejó 30 días, para así finalizar la etapa de incubación del fósforo localizado.

Se utilizó el mismo modelo matemático para calcular la cantidad de agua requerida por cada bolsa.

Figura 4. Bolsas incubando el fósforo localizado (PL) y distribuido (PUD)



## 2.6 INSTALACIÓN DE LAS BASES MANOMÉTRICAS

La base manométrica consta de una tabla de madera de 90 cm de alto, 18 cm de ancho y 2 cm de espesor, anclada a una base de madera 20 cm de largo, 18 cm de ancho y 2 cm de espesor; en la tabla de 90 cm se puso papel milimetrado marcado de 0 a 80 cm; la base manométrica que soporta ocho columnas o capilares de vidrio, en su interior lleva manguera transparente conectada a una caja de vidrio que va sobre la base de los tensiómetros, la tercera parte de los cuales se llenó con mercurio y luego se completó con agua a través de una jeringa. Este sistema permitió realizar las lecturas a -15 kPa (12 cm), -30 kPa (24 cm) y -50kPa (40 cm). La manguera va conectada a una cápsula porosa de porcelana que se encuentra ubicada en el segundo tercio de la materia donde se realizó la siembra; de ésta, se puso 15 cm de manguera transparente conectada a una jeringa de 50 ml que sirvió para escorbar o purgar el sistema. Para el experimento se utilizaron nueve bases manométricas conectadas a las 72 materas que sirvieron de tratamientos para las tres repeticiones (ver figura 5).

De esta manera, cuanto más seco esté el suelo mayor presión de succión ejercerá sobre la cápsula, y mayores serán los valores de presión que marcará. Cuando se aplica agua ocurre el proceso contrario, el agua penetra a través de la cápsula porosa de porcelana, reduciéndose la tensión, cayendo la columna de mercurio hasta llegar a su valor inicial cero, en caso de quedar el suelo a capacidad de campo que es la humedad requerida inicialmente para el ensayo.

Figura 5. A) Base instalada con ocho materas y ocho cápsulas; B) Lectura de Hg en los capilares de la base manométrica



Pasados los 30 días de incubación del fósforo, se pasó el suelo de las bolsas plásticas a las materas.

Para el fósforo Localizado (PL), primero se introdujo un tubo de PVC de 2,5 pulgadas de diámetro y 40 cm de altura en el centro de la matera y se comenzó a vaciar el contenido de los 3,5 k de suelo alrededor del tubo; se fueron depositando dentro del tubo los restantes 1,5 k y al mismo tiempo se instaló la cápsula de porcelana en cada matera a la altura del tercio medio, con la ayuda de un tubo de PVC de 0,5 pulgadas y nivelada con la base del tensiómetro. Posteriormente se realizó la siembra depositando 0,33 g de semilla por especie por matera. Durante 30 días se aplicó agua manteniendo a capacidad de campo para facilitar su germinación y empezar a efectuar lecturas diarias entre 6:00 y 7:00 horas de la mañana, de acuerdo a los potenciales propuestos.

Los datos registrados se complementaron con lecturas del termohigrómetro de temperaturas máximas, mínimas y de humedad relativa. La fertilización se realizó de acuerdo al resultado del análisis de suelos con el método biológico y la técnica del elemento faltante.

## 2.7 REVISIÓN DE CÁPSULAS

El procedimiento consistió en someter las cápsulas porosas de porcelana a hidratación, en un recipiente con agua durante 48 horas, antes de empezar a funcionar.

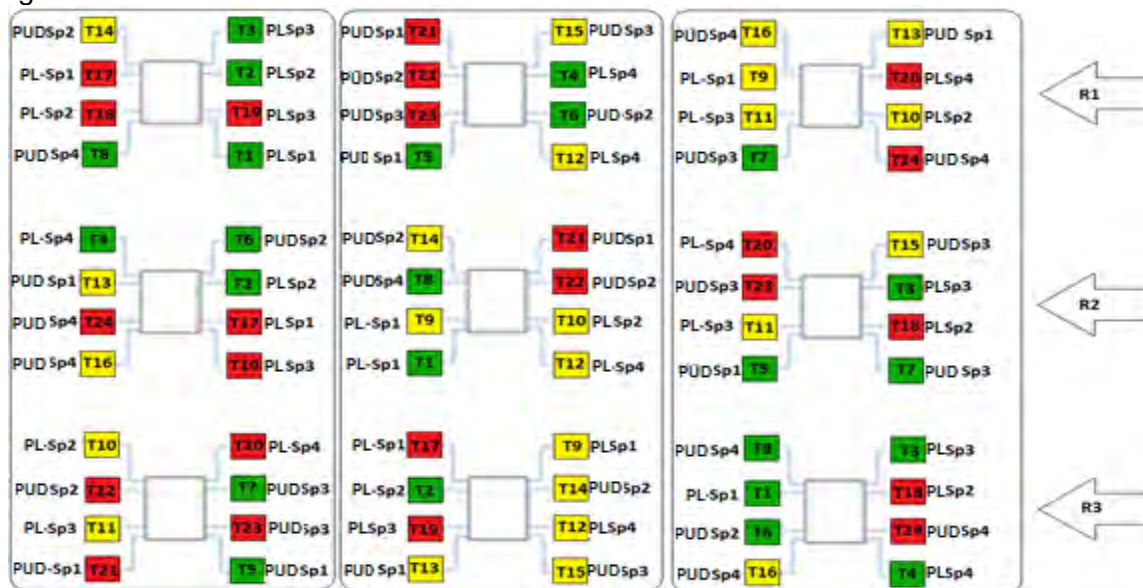
## 2.8 DISEÑO EXPERIMENTAL

El ensayo corresponde a un diseño en bloques completos al azar con arreglo factorial, tres repeticiones. Los tratamientos fueron cuatro gramíneas: Mulato II, Cayman, Mombasa y Toledo, tres potenciales matriciales -15 kPa, -30 kPa y -50 kPa y dos localizaciones de



P uniformemente distribuido y localizado para 24 tratamientos por bloque y 72 tratamientos para las 3 repeticiones (Figura 6, cuadro 1).

Figura 6. Ubicación de los tratamientos



R: Repetición  
Sp1:Mulato II  
Sp2: Cayman  
Sp3:Toledo  
Sp4:Mombasa

T: Tratamiento  
PUD: Fósforo Uniformemente  
Distribuido  
PL: Fósforo Localizado

■ -15 kPa (12cm)  
■ -30 kPa (24cm)  
■ -50 kPa (46cm)

Cuadro 1. Tratamientos

Tratamiento	Tratamiento	Tratamiento	Tratamiento
T1	PL -15 kPa mulato II	T13	PUD -30 kPa mulatoll
T2	PL -15 kPa cayman	T14	PUD -30 kPa Cayman
T3	PL-15 kPa Toledo	T15	PUD -30 kPa Toledo
T4	PL-15 kPa mombasa	T16	PUD -30 kPa mombasa
T5	PUD -15 kPa mulato II	T17	PL -50 kPa mulato II
T6	PUD -15 kPa cayman	T18	PL -50 kPa cayman
T7	PUD-15 kPa Toledo	T19	PL-50 kPa Toledo
T8	PUD-15 kPa mombasa	T20	PL-50 kPa mombasa
T9	PL -30 kPa mulato II	T21	PUD -50 kPa mulato II
T10	PL -30 kPa cayman	T22	PUD -50kPa cayman
T11	PL-30 kPa Toledo	T23	PUD-50 kPa Toledo
T12	PL-30 kPa mombasa	T24	PUD-50 kPa mombasa

## 2.9 INSTALACIÓN DEL EXPERIMENTO

**2.9.1 Descripción de los tensiómetros.** Constan de una base manométrica conectada a una cápsula semiporosa a través de dos mangueras transparentes de poliuretano.

**Base manométrica:** posee dimensiones de 90 cm de altura por 18 cm de ancho, 2 cm de espesor y consta de las siguientes partes.

**Banco de medición:** está hecho de madera, liviano, robusto; pintado de color blanco para mejorar el contraste de lecturas.

**Escala milimétrica de lectura:** está adherida al banco de medición, con fondo blanco para asegurar alto contraste en la toma de la lectura; posee escala milimétrica de 1mm x 1mm para lecturas de 0 a 800 mm (80 cm), está diseñada para 8 capilares de vidrio.

**Capilares de vidrio:** están fabricados en vidrio boro 3,3 para resistencia a altas temperaturas, pulido en ambos extremos, fijado mediante tabique metálico a la escala de medición. Ocho unidades por módulo.

**Cajuela de almacenamiento de Mercurio:** está construida en material de vidrio de alta transparencia, totalmente hermética e inerte químicamente al Mercurio, posee medidas de 13cm x 3,2cm x 3,3cm; con dispositivo de llenado y evacuación.

Figura 7. Cápsula semiporosa de porcelana



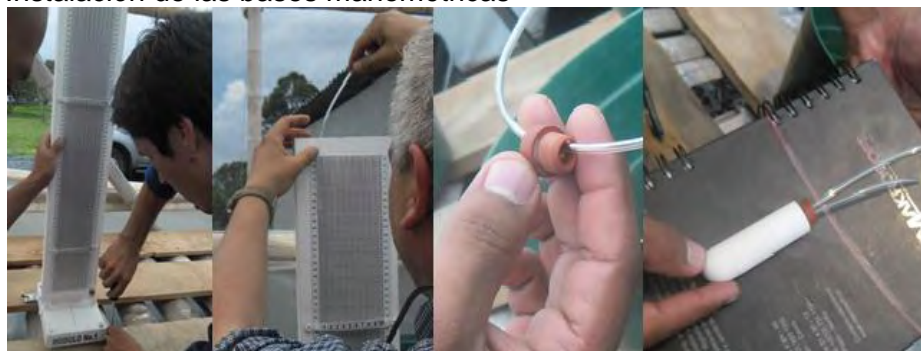
## 2.10 INSTALACIÓN DE LOS TENSIÓMETROS

Las nueve bases manométricas se distribuyeron en las tres mesas, se dispusieron uniformemente al interior del invernadero, se nivelaron y fijaron. Por cada base manométrica se pesaron 5 k de suelo que se ubicaron en las ocho materas, para un sub total de 24 materas por mesa y un total de 72 materas para las nueve bases manométricas.

A través de los capilares de vidrio de las bases manométricas, se introdujeron los extremos de las mangueras de poliuretano cortados en bisel hasta llegar a las cajuelas ubicadas en la parte inferior de cada base; estas cajuelas de vidrio se llenaron con

mercurio hasta una tercera parte y luego se completaron con agua por medio de una jeringa. El otro extremo de la manguera se conectó a un tapón de caucho pigmentado de alta elasticidad a través de una de sus dos perforaciones. A la otra perforación se colocó una manguera de poliuretano de 15 cm unida a una jeringa de 50 ml, para escorbar o purgar el sistema diariamente entre las 5 pm y 7 pm (figura 8).

Figura 8. Instalación de las bases manométricas



Los tapones fueron colocados en cada una de las cápsulas de porcelana y sellados con masilla epóxica, a 5 cm de profundidad del suelo en cada materia y a nivel de la cajuela del mercurio. Este sistema permitió a diario realizar las lecturas por los capilares donde asciende el mercurio de acuerdo a los potenciales de -15 kPa (12 cm), -30 kPa (24 cm) y -50 kPa (40 cm)

Figura 9. Bases manométricas con las materas



## 2.11 MEDICIÓN DEL POTENCIAL Y DETERMINACIÓN DEL AGUA A APLICAR

Transcurridos los 45 días de capacidad de campo, se aplicaron los potenciales determinados -15 kPa, -30 kPa y -50 kPa.

Para realizar la medición del potencial y determinar la cantidad de agua a aplicar, en las horas de la tarde 5pm – 7pm se purgaron los tensiómetros, lo cual consistió en llenar con agua las cápsulas porosas con las jeringas de 50 ml; en este proceso se da inicio a la humectación de la parte exterior de la cápsula, alcanzándose equilibrio con el agua del suelo, debido a que el suelo de la materia por efecto de la evaporación y la transpiración de la planta, se va deshidratando; al salir el agua se crea una presión dentro del tensiómetro, diferencia que es medida por la altura de la columna de mercurio.

Una vez obtenida la altura de la columna de mercurio, con ayuda de la curva de retención de humedad establecida en el análisis de suelo y el modelo matemático de fit que describió la función de la curva de retención de humedad (figura 10), se determinó la cantidad de agua requerida para mantener cada una de las materas en el potencial establecido (saturación de agua: -15 kPa, capacidad de campo: -30 kPa y restricción de agua: -50 kPa). La lectura de la altura de la columna de mercurio y la aplicación del agua a cada materia se realizó a diario entre la 6 am y las 8 am, durante el tiempo de duración del ensayo.

Figura 10. Curva de retención de humedad

POT (-(-kPa))	a	b	altura columna Hg (cm)	agua (kg/kg suelo)
5	0,12577122	3,1895853	4	764
10	0,12577122	3,1895853	8	445
15	0,12577122	3,1895853	12	338
20	0,12577122	3,1895853	16	285
25	0,12577122	3,1895853	20	253
30	0,12577122	3,1895853	24	232
35	0,12577122	3,1895853	28	217
40	0,12577122	3,1895853	32	205
45	0,12577122	3,1895853	36	197
50	0,12577122	3,1895853	40	180
55	0,12577122	3,1895853	44	184

CURVA HIPERBÓLICA  
Fit =  $Y = (a + (b/x))$   
 $H_2O = (0,12577122 + (3,1895853/POT))$

## 2.12 MEDICIÓN DE LA EVAPORACIÓN DIARIA

Adicionalmente a las 72 materas que contenían las gramíneas del ensayo, se dispusieron 3 materas sin gramíneas con el fin de medir la cantidad de agua que se evaporaba diariamente. Se colocó 1 materia por cada potencial -15 kPa, -30 kPa y -50 kPa. Para determinar estas pérdidas por evaporación, en las horas de la mañana (6am – 8am) se pesaron las materas para encontrar la cantidad de agua evaporada en el transcurso del día y con esta lectura se realizó la reposición del agua.

Para determinar la reposición se tuvo en cuenta la cantidad de agua que debería tener cada materia de acuerdo al potencial correspondiente, cantidad que se determinó por medio de la curva de retención de humedad que se estableció en el análisis de suelos 1680 ml de agua para -15 kPa, 1150 ml para -30 kPa y 938 ml para -50 kPa.

### 2.13 REGISTROS DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA

Diariamente entre las 6:30 am y 9:00 am se registraron los datos de temperatura máximas y mínimas, por medio de un termo higrómetro ubicado al interior del invernadero y la humedad relativa (figura 11).

Figura 11. Registro diario de temperatura y humedad relativa



Para el cumplimiento del segundo objetivo específico: “Correlacionar los contenidos de nutrientes en el suelo y la planta a diferentes potenciales matriciales”, se realizaron las siguientes actividades.

### 2.14 PROCEDIMIENTO PARA FERTILIZACIÓN

Se tomó la cantidad correspondiente de cada elemento, se emplearon reactivos en lugar de fertilizantes comerciales con el fin de incrementar la solubilidad y reducir contaminaciones (Cuadro 2).

Cuadro 2. Fuentes y cantidades aplicadas

Elemento	Fuente	Cantidad (g)	Pureza (%)	Marca
N	Urea	108,75	99,5	Rihedeldehaen
P	NaH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> H <sub>2</sub> O	568,05	99,5	Merck
K	KCl	96,10	99,5	Erba

Cuadro 2. (Continuación)

Elemento	Fuente	Cantidad (g)	Pureza (%)	Marca
Ca	CaCO <sub>3</sub>	312,50	99,5	Erba
Mg	MgCO <sub>3</sub>	258,60	99,5	Erba
S	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	108,75	99,5	Merck
Cu	CuCl <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	6,90	99,5	Erba
Zn	ZnCl <sub>2</sub>	10,40	99,5	Merck
Mn	MnCl <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	35,65	99,5	Merck
Fe	FeC <sub>6</sub> H <sub>5</sub> O <sub>7</sub> ·3H <sub>2</sub> O	65,80	99,5	Merck
Mo	NaMoO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	6,25	99,5	TjBeaker
B	NaB <sub>4</sub> O <sub>7</sub> ·10H <sub>2</sub> O	20,80	99,5	Erba

Se preparó una solución por cada elemento, diluyéndolo en un litro de agua destilada para N, K y otra para los elementos menores, teniendo en cuenta que el citrato de calcio debe disolverse en agua caliente antes de ser agregado a los demás nutrientes S, Cu, Zn, Mn, Mo, Fe, B. Para el Ca y Mg se hizo la mezcla individual con el mismo procedimiento y se aplicó cinco días después del resto de nutrientes para reducir la formación de precipitados, en especial con los fosfatos. Después se completó cada solución llevándola a 5 litros y almacenándola en galones plásticos previamente rotulados con cada reactivo utilizado como nutriente.

Figura 12. Pesaje de los reactivos para fertilizar



## 2.15 ESTABLECIMIENTO DE LAS GRAMÍNEAS

Una vez instalados los tensiómetros se realizó la siembra; se depositaron 0,33 g de semilla de *M. maximus* cv. *Mombasa*, *B. brizantha* cv. *Toledo*, *B. híbrido* cv. *Cayman* y *B. híbrido* cv. *Mulato II*, para cada matera, teniendo como base la cantidad de semilla que se requería para sembrar una hectárea de terreno, de acuerdo a lo establecido por Peter *et al.* (2011).

Durante los 45 días posteriores a la siembra las materas se mantuvieron a capacidad de campo; en un inicio se aplicaron 1160 ml de agua, según lo establecido en la curva de retención de humedad determinada en el análisis de suelo (figura 10), y en adelante diariamente se aplicó el agua necesaria para mantener la humedad, reponiéndose las

pérdidas por evaporación y transpiración diaria, la aplicación se realizó por medio de una bomba manual calibrada para lograr un mojado uniforme.

Figura 13. Siembra de las plantas



A los 20 días de la siembra se hizo la primera fertilización, excepto Ca y Mg, dividiéndola en dos partes iguales de 2,5 litros por aplicación, correspondiéndole 34,7 ml de solución por cada materia empezando por los elementos mayores N, K y terminando con los menores. Todos fueron aplicados en solución sobre el suelo húmedo. Pasados cinco días de la fertilización, se hizo la aplicación de 34,7 ml de Ca y Mg por cada materia para evitar la formación de precipitados (Figura 14).

Figura 14. Fertilización a los 20 días



A los 60 días de la siembra se realizó la medición de las variables cualitativas para cada uno de los tratamientos: altura (cm), vigor (calificación 1 a 5) y cobertura (%), y se realizaron observaciones para cada tratamiento y repetición. A partir del día 33 posterior a la siembra y durante 86 días entre las 6:30 y 9:00 horas se llevó a cabo la toma de datos, llenado de registros y la aplicación diaria de agua según la tensiometría para cada tratamiento, así como otras evaluaciones agronómicas. Entre las 17:30 y 18:30 horas se realizó la escorbada o purgada de todo el sistema tensiométrico, el cual marcaba diariamente la necesidad hídrica para cada tratamiento (Toledo, 1982).

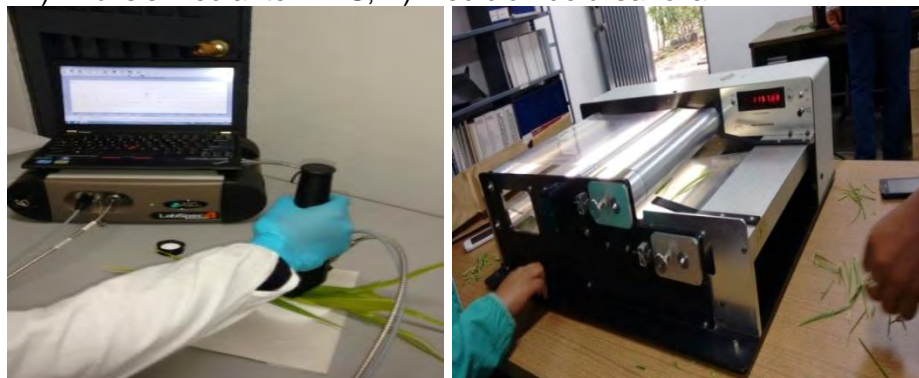
Pasados 70 días de la siembra se realizó el primer corte, se pesó el forraje verde por cada tratamiento, se empacaron en bolsas dobles de papel kraft debidamente rotulados por tratamiento y repetición y se llevaron las muestras al horno donde fueron deshidratadas durante 72 horas a 70°C para obtener el porcentaje de materia seca por tratamiento. Se repitió el procedimiento a los 45 días en el segundo corte.

Figura 15. Corte, pesaje y embalaje de muestras de los forrajes



Estas muestras fueron llevadas en fresco al CIAT Palmira, donde fueron analizadas en su parte química NIRS (espectroscopia del infrarrojo cercano), física (área foliar y ms) y análisis del contenido de fósforo.

Figura 16. A) Análisis mediante NIRS; B) Medición de área foliar



Para el cumplimiento del tercer objetivo específico: “Determinar la eficiencia de utilización de nutrientes (EUN) y los coeficientes de utilización biológica (CUB) en las especies en estudio, bajo los diferentes potenciales matriciales”, se realizaron las siguientes actividades:

El tercer corte se realizó a los 157 días; se determinó el peso de forraje verde, se separaron las raíces las cuales fueron lavadas en agua destilada, se pesaron, empacaron



en bolsas de papel kraft y se llevaron al horno durante 36 horas a 60°C; posteriormente se entregaron al laboratorio de forrajes del CIAT para analizar su contenido total de fósforo, FDA, FDN, proteína cruda y MS (Figura 17).

Figura 17. A) Extracción. B) Lavado, C) Pesaje embalaje D) Secado de raíces



Por último se tomaron seis muestras de suelos, una por cada potencial -15, -30, -50 para fósforo localizado y uniformemente distribuido, y se enviaron al laboratorio del CIAT para el análisis completo respectivo (Figura 18).

Figura 18. Toma de las muestras de suelo



## 2.16 VARIABLES EVALUADAS

**2.16.1 Vigor.** Esta variable se tomó observando el crecimiento, desarrollo y sanidad de la planta, así como el grosor del tallo, cantidad y color de las hojas producidas. Se analizó en una escala de 1 a 5, siendo 1 el peor, 2 regular, 3 medianamente bueno, 4 bueno y 5 excelente (Toledo, 1982).

**2.16.2 Cobertura.** Se registró según la proporción aparente que las especies cubrían en el área de cada materia; se asignaron valores dentro del rango de 0 a 100 (Toledo, 1982).

**2.16.3 Altura de plantas.** La altura de los 72 tratamientos se midió en centímetros desde el suelo hasta el punto más alto de la planta, sin estirla y sin contar las inflorescencias (Toledo, 1982).

**2.16.4 Producción de forraje verde.** La producción de biomasa aportada por cada especie estudiada se evaluó en el primer y segundo corte, determinando la disponibilidad de biomasa seca que se obtuvo por cada tratamiento o bien en el área de cada uno de ellos (Toledo, 1982).

**2.16.5 Producción de materia seca.** Del forraje verde (FV) se pesaron las sub muestras de cada tratamiento, se sometieron a un proceso de secado en horno y con su peso final se calculó la materia seca, dato que se proyectó la producción a ha/corte.

**2.16.6 Índice de Área Foliar.** Para determinar IAF ( $m^2$ ) se midió el área foliar mediante el lector óptico marca LI-COR, modelo LI-3000A. Se convirtió el área total de la materia que contenía cada planta de  $cm^2$  a  $m^2$ . El área foliar se dividió entre el área de la materia para obtener el IAF.

## **2.17 ANÁLISIS ESTADÍSTICO**

Para el análisis y procesamiento de la información, se realizó un análisis de varianza para determinar si existían diferencias para los factores, sus interacciones y los tratamientos, mediante prueba de HDS de Tukey ( $PR \leq 0,05$ ).

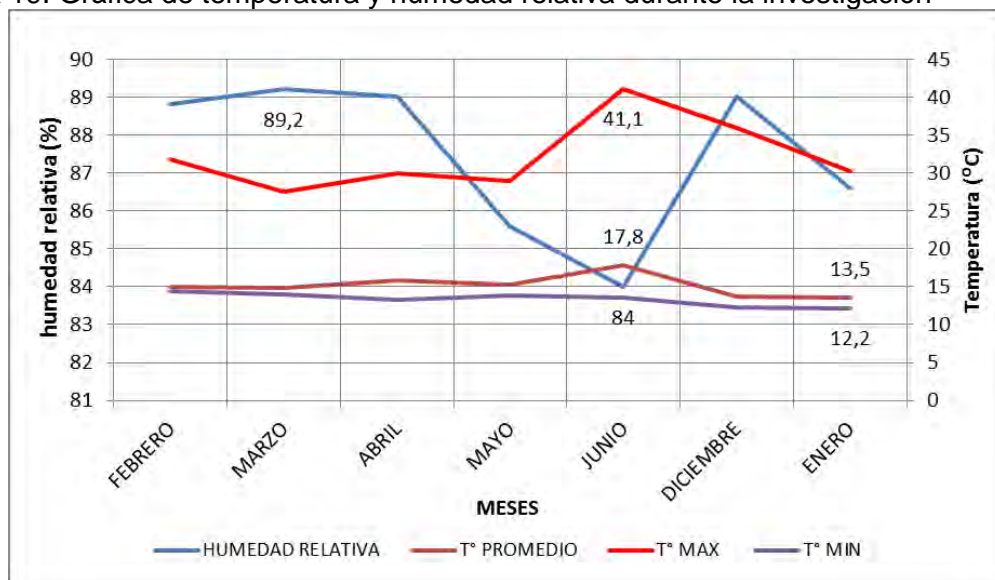
Para establecer los niveles de relación entre las variables evaluadas durante el ensayo, se realizó una prueba de Correlación de Pearson.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 CONDICIONES CLIMÁTICAS

**3.1.1 Condiciones de temperatura y humedad en establecimiento.** Durante el tiempo de estudio, el promedio de temperatura fue de 15,1°C, con una máxima en el mes de junio de 41,1°C y una mínima en el mes de enero con 12,2°C, presentándose una humedad relativa promedio de 87,4% en el interior del invernadero (figura 19).

Figura 19. Gráfica de temperatura y humedad relativa durante la investigación



Para las condiciones climáticas, se tuvieron en cuenta los promedios de temperatura y precipitación tomados de la estación meteorológica de Patía.

Se observa una distribución de lluvia bimodal (figura 19) con dos periodos lluviosos que van de octubre a diciembre y de febrero a abril, siendo abril el mes más lluvioso con un promedio de 489 mm. El periodo o estación seca corresponde a los meses de mayo a septiembre, siendo mayo, junio y julio los meses menos lluviosos con 11 y 8 mm, respectivamente. La distribución de la temperatura durante todo el año están en el rango de 25,5 y 28,3°C (IDEAM, 2013).

#### 3.2 VARIABLES AGRONÓMICAS

En el cuadro 3 se presentan los resultados de los análisis de varianza para las variables agronómicas analizadas en esta investigación.

Cuadro 3. Cuadrado medio (CM) del análisis de varianza para las variables: Vigor (V.), Cobertura (Cov.), Altura (Alt.); Índice de área foliar (IAF); Rendimiento materia seca (RMS)

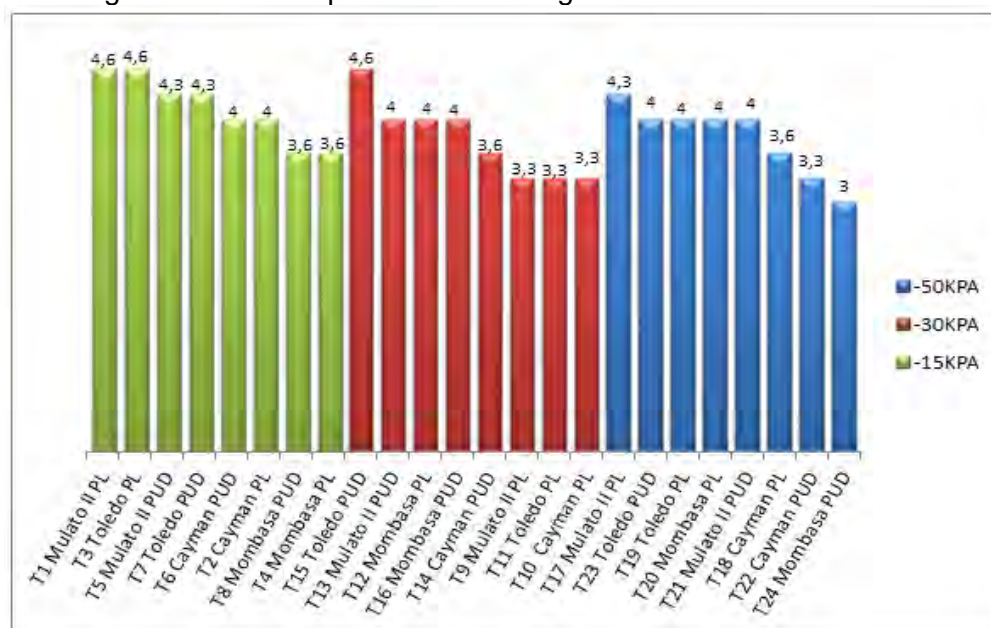
F.V	Vigor (V)	Cobertura (Cov.)	Altura (Alt)	I.A.Fol. (IAF)	Mat. Sec. (RMS)
	CM	CM	CM	CM	CM
Modelo	0,695 ns	1627,806 **	1316,999**	11,772 **	182,657 **
Especie	0,606 ns	1475,532 ns	1502,273*	13,665 **	51,704 ns
Fósforo	1,125 ns	1208,681 ns	703,125 ns	5,797 *	1,389 ns
Especie x Fósforo	0,273 ns	613,792 ns	78,569 ns	1,558 ns	160,796 ns
Potencial	0,931 ns	11295,375**	9507,930**	91,227	1419,097 **
Especie x Potencial	0,468 ns	910,005 ns	409,134 ns	3,544 *	49,968 ns
Fósforo x Potencial	3,041 ns	16,430 ns	740,541 ns	0,798 ns	33,513 ns
Especie x Fósforo x Potencial	0,245 ns	313,208 ns	315,597 ns	2,333 ns	59,532 ns
Error	0,9722	457,361	486,916	1,518	76,319
r <sup>2</sup>	0,2551	06303	05634	0787	0534
CV	25,08	43,31	47,05	47,90	84,99

\*\* Altamente significativo

**3.2.1 Vigor.** El análisis de varianza (Cuadro 3) no mostró diferencias estadísticas significativas para los factores potenciales matriciales, cultivares, localizaciones de fósforo de forma individual, ni en las interacciones entre las variables.

La figura 20 muestra el comportamiento de los tratamientos de acuerdo a las aplicaciones de fósforo localizado (PL) y uniformemente distribuido (PUD), por grupos según el potencial mátrico, época lluviosa (-15kPa), época de sequía (-50kPa) y suelo a capacidad de campo (-30kPa), con 4 cultivares: Mulato II, Caymán, Toledo y Mombasa.

Figura 20. Diagrama de barras para la variable vigor



La respuesta a la aplicación de fósforo (PUD y PL) en los cuatro cultivares se atribuye, según Marschener (1991), a mecanismos que dependen de características morfológicas y fisiológicas de la raíz, lo que hace que la planta absorba el nutriente directamente de la exploración que hace la raíz en el suelo en el tiempo y en el espacio radicular ocupado, incrementando la eficiencia de absorción de los nutrientes del suelo. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Olivera (2004) en Matanzas (Cuba), al evaluar accesiones de *Brachiaria brizantha* (Toledo-CIAT 26110) y Mulato II, en suelos de buena a mediana fertilidad y clima similares al Valle del Patía.

La Guinea *M. maximum* T24 presentó el menor valor (3,0) de vigor con fósforo uniformemente distribuido en condiciones de sequía (-50 kPa), confirmando lo reportado por Rubio (2002), observando que a medida que la tensión de agua en el suelo aumentó, el desarrollo del follaje disminuyó, debido a que el crecimiento celular es el proceso más sensible a una baja disponibilidad de agua, inhibiendo la división celular y la expansión radicular (Rao, 2001).

Betancur y Valencia (2011), evaluaron el comportamiento de brachiarias, encontraron un valor de 3,00 para el vigor de las plantas en fase de establecimiento en la finca el Carrizal, vereda el Tablón, Municipio de Popayán y difieren de lo reportado por Carrillo y Galíndez (2014) en el estudio realizado en la vereda Piedra de moler, municipio de Patía, Cauca, donde se evidenció que en condiciones favorables de humedad, *P. maximum* alcanza valores de 4,73, expresando todo su potencial, situación que ratifica los resultados de la presente investigación.

**3.2.2 Cobertura.** De acuerdo con el cuadro 3, existen diferencias estadísticas altamente significativas para los factores matriciales -15, -30, -50 kPa y para los cuatro cultivares. Según la prueba de HSD de Tukey (Anexo C1) el mejor cultivar fue *Brachiaria brizantha* con el 61%, atribuido al hábito de crecimiento semierecto, capacidad de macollamiento, que le permite un mayor desarrollo y abarcar áreas en menor tiempo de establecimiento (Peters *et al.*, 2011), la menor cobertura fue para la especie Mulato II con el 40%, lo que difiere a lo reportado por Segura y Legarda (2011) en la evaluación agronómica de ocho variedades de gramíneas en el Valle del Patía, donde se obtuvo un valor de 79,2% para Mulato II en la etapa de establecimiento.

Entre potenciales matriciales -15, -30, -50 kPa la prueba HSD de Tukey (Anexo C3) el mejor resultado se obtuvo a tensión de -15 kPa con el 72%; esto se debe a la disponibilidad de agua mejorando el desarrollo de los pastos y la eficiencia fotosintética; el menor valor para cobertura fue de 28% a -50kPa, debido a que a menor humedad se disminuye la absorción de agua y nutrientes, hay retención de energía por el aumento de la tensión de agua del suelo, lo cual disminuye la disponibilidad para las plantas (Sadras y Andrade, 2002).

Al realizar el análisis estadístico ANOVA (Anexo C) para las aplicaciones de fósforo y para las interacciones cultivar-fósforo, cultivar-potencial y cultivar-fósforo-potencial, no se

presentaron diferencias estadísticas ( $Pr < 0,05$ ). Marschener (1991) relaciona este comportamiento a mecanismos que dependen de características morfológicas como fisiológicas de la raíz que permite a la planta absorber el nutriente directamente de la exploración que hace la raíz en el suelo, en tiempo y en espacio, permitiendo una mayor área de cobertura e incremento en la absorción de los nutrientes.

Para la interacción entre cultivares y aplicación de fósforo (PL y PUD), no se presentaron diferencias estadísticas, sin embargo la especie Toledo presentó con PUD una cobertura del 64%, permitiéndole abarcar más área en menor tiempo debido, mayor formación de raíces entre los nudos (Peters *et al.*, 2013) posiblemente aumentando la absorción de P debido al desarrollo de la raíz por longitud, diámetro, número y distribución. La menor cobertura fue de 35% para el cultivar Mombasa con PUD según Alves *et al.* (2002), afirman que el volumen de la raíz es menor al 1% del volumen del suelo que ocupa, por lo tanto el contacto de las raíces con el P disponible en la solución del suelo posiblemente fue menor a ese porcentaje y es muy pequeña comparada con la cantidad de P que el cultivo necesita para el establecimiento.

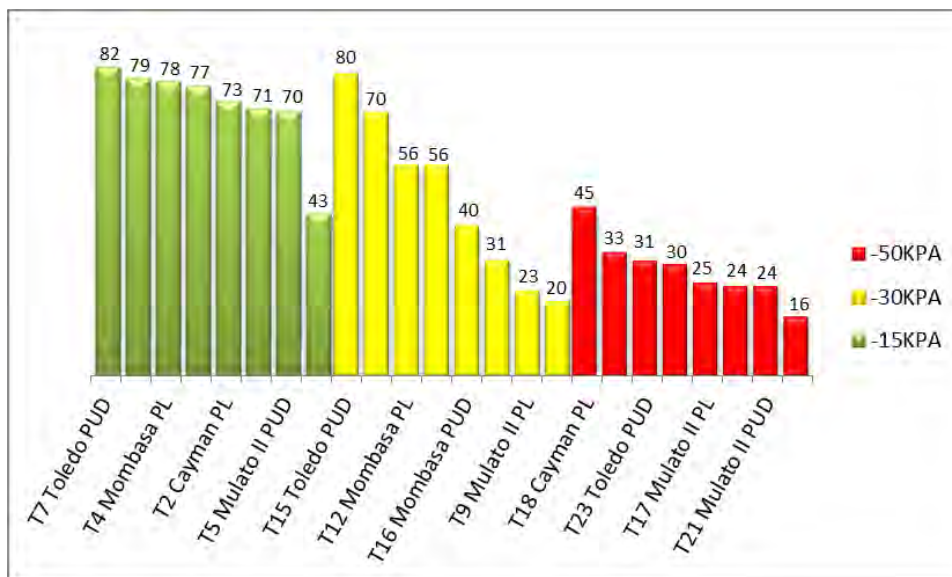
El cultivar Mulato II presentó la menor cobertura en condiciones de sequía -50kPa con un 22%; esta reducción de cobertura en las plantas según Guenni (2006), es una respuesta para evitar pérdida de agua, en caso de déficit; la mayoría de los vegetales buscan alternativas para disminuir la evaporación, principalmente reduciendo la transpiración a través de los estomas.

La figura 21 muestra los resultados de cobertura obtenidos para la interacción fósforo-especie-potencial, con valores que fluctuaron entre 82 y 43% para época lluviosa, de 80 a 20% para suelo a capacidad de campo y de 45 a 16% para época seca.

Para la interacción entre especies-aplicaciones de fósforo y potenciales, no se presentaron diferencias significativas (Anexo C6), *Brachiaria brizantha* bajo PUD a -15 kPa, fue la de mejor cobertura con el 82%. Este valor, según Abel y Ticconi (2002), se atribuye a la eficiencia en la absorción de fósforo dado las condiciones fisiológicas y bioquímicas de las raíces en las gramíneas.

El tratamiento T22 con PUD a -50 kPa presentó la menor cobertura con un valor de 16%; en la gran mayoría de zonas agrícolas y principalmente en las áridas y semiáridas, el manejo eficiente del agua de riego es un problema crítico para la especie, según lo manifiestan Aguirre y Zavala (2014), quienes trabajando con este cultivar encontraron los mejores resultados de cobertura al aplicar riegos periódicos en el momento del establecimiento.

Figura 21. Diagrama de barras para la variable cobertura (%)



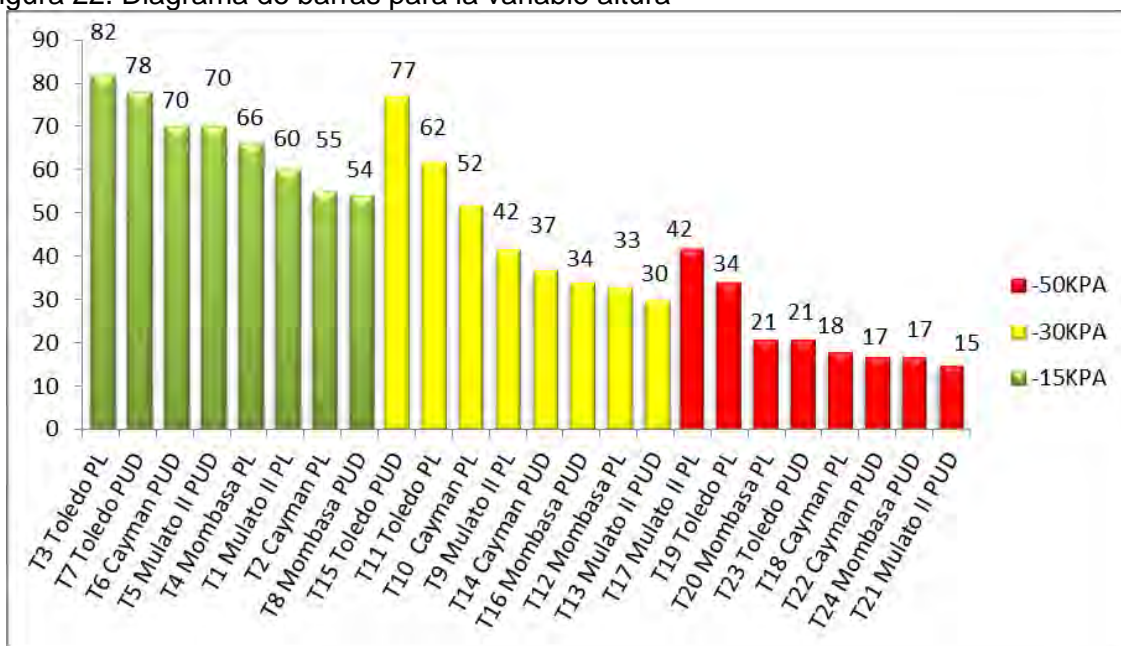
**3.2.3 Altura.** Según el análisis de ANOVA (Tabla 3), se presentaron diferencias estadísticas significativas entre cultivares y potenciales para la variable altura; el mejor cultivar fue Toledo con un valor de 59 cm, situación que confirma que esta gramínea crece muy bien en suelos de buena a mediana fertilidad, con un rango amplio de textura y pH de 4,0 a 8,0, condiciones similares a las que presentan los suelos del Patía; además, responde bien a niveles de fertilización moderados y tiene buena tasa de crecimiento durante época seca, resultados similares encontrados por Peters *et al.* (2013), quienes anuncian que el cultivar Toledo tolera la sequía y se adapta a diferentes condiciones edafoclimáticas.

Se determinó que el mejor potencial fue -15 kPa; se observó un mayor crecimiento a medida que la disponibilidad de agua en el suelo aumentaba; según Sylvia *et al.* (1995), cuando un cultivo tiene una frecuencia de riego adecuada, aumenta la altura de la planta, área foliar y rendimiento. La menor altura se presentó en el potencial -50kPa; según Brito *et al.* (2014), los cambios en la humedad del suelo en la fase de establecimiento de un cultivo, pueden poner en riesgo la producción de asimilados, viéndose reflejado en un menor crecimiento de la planta.

Mombasa a un potencial matricial de -50 kPa, presentó la menor altura con 19 cm; su baja repuesta se atribuye al estrés hídrico simulado en la etapa de establecimiento. Para el caso, Lacerda *et al.* (2009) muestran que un cultivo sometido a estrés hídrico o en un manejo inadecuado de agua de riego disminuye el crecimiento y la calidad, e incrementa la competitividad de las plantas para lograr su máximo desarrollo, Peters *et al.* (2013).

La figura 22 muestra los resultados de altura obtenidos para la interacción fósforo-cultivar-potencial, con un rango de valores entre 82 y 54 cm para época lluviosa, de 77 a 30 cm para suelo a capacidad de campo y de 42 a 15 cm para época seca.

Figura 22. Diagrama de barras para la variable altura



Los mejores tratamientos fueron T7 con un valor de 82cm y T3 de 78 cm, correspondiendo a *Brachiaria brizantha* a -15 kPa con PUD y LP respectivamente. Según Mejía (2007), un adecuado manejo de la humedad del suelo y un suministro de fósforo, las *Brachiaris* responden bien para su crecimiento, desarrollo y aumento de la biomasa.

Mulato II presentó la menor altura con un valor de 15,55 cm en PUD a -50 kPa; la principal causa puede ser el estrés hídrico al que fue sometido desde su fase de establecimiento que incidió quizás sobre una atrofia radicular a causa de cambios moderados de temperatura y bruscos en la aplicación de agua desde la etapa de establecimiento hasta la fase de producción. Alves.et al (2002). Según Toledo (1982), las gramíneas una vez establecidas adquieren sistemas naturales de defensa, que les permiten mantener la producción en el tiempo, resistiendo los cambios climáticos a que pueden ser sometidas naturalmente, pero esa adaptación se puede ver interrumpida en la etapa de establecimiento que es donde los cultivares requieren de agua, del elemento fósforo y condiciones de temperatura ambiente

**3.2.4 Índice de área foliar.** En el cuadro 3 se puede observar que se encontraron diferencias altamente significativas, entre los cuatro cultivares y diferencias significativas para los tres potenciales matriciales, así como para la interacción cultivar por potencial. La prueba de Tukey, (Anexo E1) determinó que cv Toledo tuvo el mayor IAF 3,68, este comportamiento es similar a los resultados obtenidos por Bustamante e Ibrahim (1998) para cultivares de *B. brizantha*, en la estación experimental “La Montaña” del CATIE, ubicada en Turrialba, Costa Rica (602 msnm), donde se tienen promedios en IAF de 3,2 y para el género *Megathyrus* superiores a 8,5, difiriendo en el IAF obtenido en este ensayo que alcanzó una media de 1,5 para *M. Maximus* cv Mombasa; esto se puede explicar

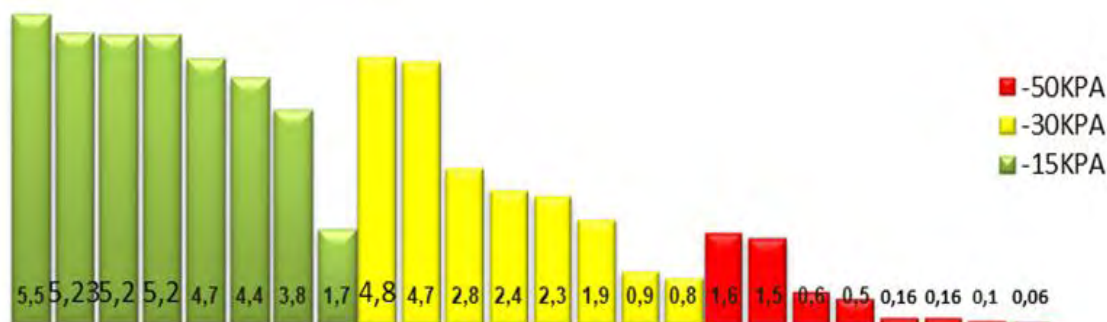


debido a la variación de características estructurales de las pasturas, tales como densidad y tamaño de macollos en respuesta a cambios en el ambiente lumínico, que pueden ser explicadas a partir de mecanismos de plasticidad fenotípica desarrollados por las plantas (Colabelli y Mazzanti 1998), esto es, respuestas fisiológicas y morfológicas ante la cantidad y calidad de luz, en este caso por la cubierta plástica del invernadero que disminuye la calidad lumínica y el tiempo de horas luz.

La prueba de Tukey mostró significancia entre potenciales (Anexo E3), ubicó a -15 kPa con un IAF de 4,5 por delante de los potenciales -30 y -50 kPa con 2,6 y 0,6 respectivamente; el bajo IAF se explica por la disminución en la oferta hídrica, Guenni (2006) encontró "Respuestas al déficit hídrico una caída en producción de biomasa aérea de alrededor del 60% comparando periodo de sequía con oferta óptima de agua, en donde el IAF se redujo un 42%.

Para la interacción Especie–Potencial, que presentó igualmente diferencias estadísticas significativas, en la prueba de Tukey (Anexo E5) se encontró diferencias significativas, Toledo -15 kPa con un valor de 5,2 fue el mejor, mientras que Mombasa a -50 kPa fue el menor con un valor de 0,11. Estos resultados confirman que el cultivar Toledo alcanza el mayor IAF por su buena adaptación a climas y suelos del trópico húmedo, (CIAT 2007) y al disminuir drásticamente la oferta hídrica a -50 kPa se presentan cambios en el crecimiento y limitación de la expansión foliar. Si el área foliar es importante para la fotosíntesis, una rápida expansión puede afectar negativamente la adaptación a la poca disponibilidad de agua para las gramíneas (Nilsen y Orcutt, 1996). Según lo reportado por Kephart y Buxton (1983), el área foliar de plantas C3 y C4 disminuyó al reducir la sombra en condiciones de sequía, cuando hay luz insuficiente la fotosíntesis es menor y casi todo el fotosintato es retenido por los brotes limitando el desarrollo foliar (Daubenmire, 1999).

Figura 23. Diagrama de barras para la variable Índice de área foliar (IAF)



Según Alves *et al.* (2002), el diámetro de las raíces es uno de los atributos más importantes en la absorción de fósforo y depende del diámetro de la raíz, que define el volumen máximo de suelo que puede ser explorado. El menor IAF a -15 kPa fue de 1,7 correspondiente a Mombasa bajo PUD (T8); este índice difiere de Mombasa con PL en el mismo régimen hídrico con un valor de 4,44; de acuerdo con Rao y Terry (1996), con

mayor disponibilidad de fósforo se presenta un incremento del área foliar, siendo claro el efecto causado por los bajos niveles de fósforo en donde la planta reduce la expansión de la hoja y el área de la superficie foliar.

En el potencial a - 15 kPa los valores de los tratamientos T6 (5,23), T3 (5,2), T7 (5,2), T14 (4,48) y T2 (3,86), fueron mayores al promedio para ese potencial de 3,84; esto se atribuye a la combinación entre la oferta hídrica y el fósforo aplicado durante el ensayo. Según lo evaluado por Rao et al. (1998), la adaptación del género *Brachiaria* para la absorción del P se debe al sistema radicular que proporciona mayor contacto con la solución nutritiva del suelo y la capacidad de usar formas orgánicas e inorgánicas insolubles de P, las cuales generalmente no están disponibles para las plantas, siendo la sequía un factor limitante para la absorción del elemento utilizado en la producción.

Cuando los pastos se sembraron en un régimen mátrico a -30 kPa simulando capacidad de campo y la aplicación de fósforo (PL) y (PUD), el valor de IAF para los tratamientos T10, T9, T14, T12, T16 y T13 oscilaron entre 2,81 y 0,8, los valores más altos corresponden a T11 (PL) con 4,8 y T15 (PUD). Según Peters (2013), estos resultados pueden obedecer al amplio rango de adaptación a clima y suelo que presentan las gramíneas, altitudes de 0 a 1800 msnm y precipitaciones entre 1000 y 4600 mm año y distribución de lluvias que van desde periodos largos de sequía hasta distribuciones de lluvias moderadas, cultivados en suelos de mediana fertilidad, condiciones similares a las del valle del Patía.

A -30 kPa, Mombasa con PUD (T16) tuvo un índice de 0,9, valor bajo que supera a Mulato II con PUD (T13) con un valor 0,8. De acuerdo con Colabelli y Mazzanti (1998), el conjunto de efectos del déficit hídrico sobre las variables morfo genéticas a nivel foliar y radicular, determina una fuerte incidencia sobre el desarrollo del cultivo, afectando directamente el IAF, el cual es más notorio al inicio del cultivo.

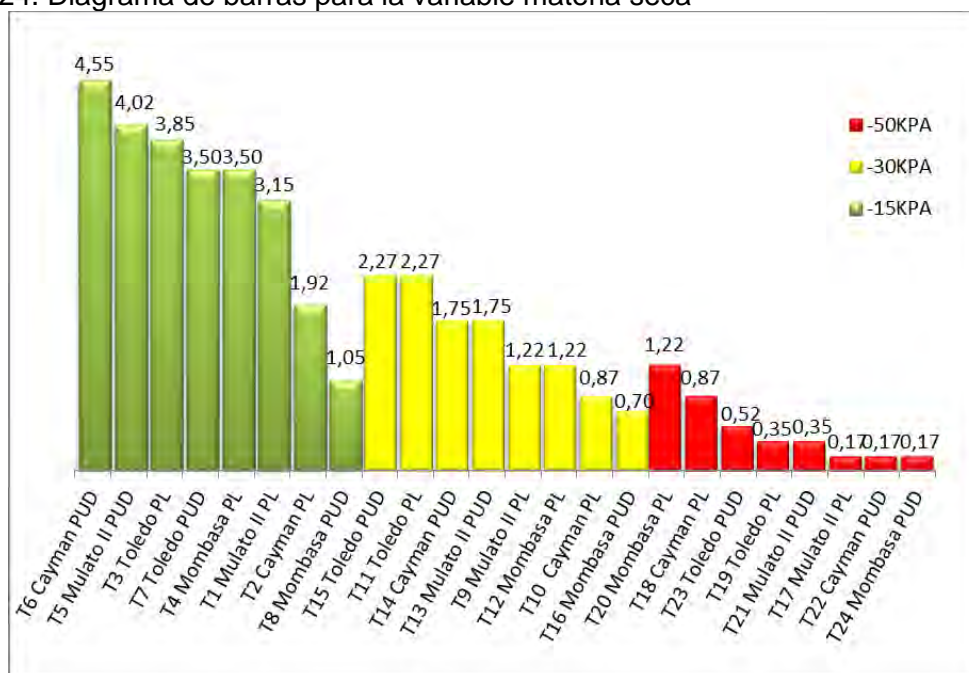
Al desarrollarse los cultivares en un suelo a -50 kPa el IAF se afectó considerablemente, en general, todas las plantas poseen mecanismos de aclimatación que se activan en respuesta a estrés hídrico. Cuando el déficit hídrico se desarrolla lentamente, se dan cambios en procesos de crecimiento y desarrollo y el principal efecto de importancia es la limitación específica de la expansión foliar. Aunque del área foliar depende la fotosíntesis, una rápida expansión foliar puede afectar negativamente la adaptación a la poca disponibilidad de agua; para las gramíneas, esta consideración de Nilsen y Orcutt (1996) es consecuencia directa cuando se quieren seleccionar especies resistentes a periodos largos de sequía o inundaciones, porque de ella depende la producción por área. Según los resultados, el cultivar Toledo en PL (T19) con un valor de 1,65 confirmó su adaptabilidad a los ambientes secos (Peters *et al.*, 2013), seguido por Mulato II y Cayman con 1,5 y 0,61 respectivamente; estos híbridos se caracterizan por su muy buena adaptación a sequía y gozan de la buena aceptación de los productores, según lo observado por el CIAT (2007) en campo y en las capacitaciones realizadas a diferentes grupos de ganaderos. Las mismas apreciaciones reafirman a la especie Mombasa como

la más susceptible a suelos saturados por periodos largos, cuando se sembró en suelo con PUD a -15 kPa obteniendo un valor de IAF de 0,06.

**3.2.5 Materia seca.** El análisis de varianza no presentó diferencias significativas entre tratamientos (Tabla 3), en ese sentido comparando por rendimientos se puede afirmar que el ensayo mostró, que estadísticamente los rendimientos en los diferentes materiales sometidos a tres potenciales matriciales de agua del suelo y localizaciones de fósforo, fueron similares estadísticamente. Sin embargo vale resaltar que cv. Toledo obtuvo un rendimiento de 2,17 t/ha de ms, valor estimado a partir del área del vaso ocupado por el pasto en el ensayo. El estudio de CIAT (2002) en asociación con la Red Colombiana de *Brachiaria*, encontró en diferentes sitios de Colombia rendimientos de ms para el cv Toledo que variaron entre 2,52 y 3,32 t/ha/año de materia seca; este mismo estudio indica que *Brachiaria brizantha* y algunos de sus cultivares se sitúan por encima de otras accesiones de *brachiaria*, como lo es la ascendencia (CIAT 36061) de los híbridos en estudio: Mulato II y Cayman, que en el ensayo alcanzaron producciones de 1,84 y 1,74 t de ms/ha respectivamente y el cv. Mombasa que alcanzó 1,45 t de ms/ha,

Ludlow (1989) y Chaves *et al.* (2003); Afirman que la mayor parte de las gramíneas forrajeras tropicales muestran respuestas a la sequía de tipo evasivo; esto incluye cambios morfológicos que incrementan el acceso a la humedad del suelo y minimizan las pérdidas de agua por transpiración, por lo que la eficiencia de uso de agua aumenta; también existe la respuesta de tolerancia, que permite el mantenimiento de la turgencia celular aún a potenciales hídricos foliares bajos. Como consecuencia, las plantas mantienen durante la sequía una actividad fotosintética reducida pero capaz de soportar el crecimiento por un tiempo mayor (Chaves, 1991; Chaves *et al.*, 2003).

Figura 24. Diagrama de barras para la variable materia seca

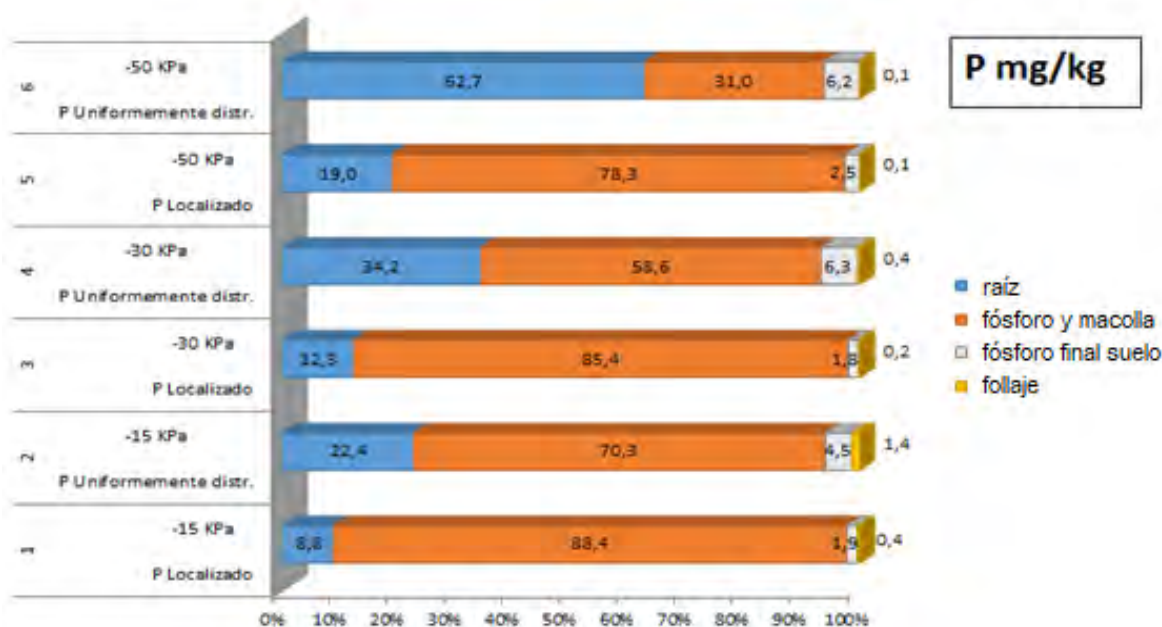


A -30 kPa, el cultivar con mayor producción de MS fue T15 en PUD y PL T11 con una producción de 2,27 t de ms/ha/corte; Betancur y Valencia (2011) en la evaluación realizada en la vereda El Tablón, municipio de Popayán con *Brachiaria brizantha* (Toledo CIAT 26110) obtuvieron una producción de materia seca de 7,097 t de ms/ha/corte siendo está la mejor especie en respuesta a la variable producción, donde se evidenció una mejor adaptación a esas condiciones edafoclimáticas. En el estudio realizado por Lara (2005) en La Libertad, departamento de Petén Guatemala, en el que evaluó la adaptación y producción de biomasa de nueve gramíneas mejoradas, entre ellas Toledo, reporta producciones de 3,11 t de ms/ha/corte, aproximándose a los resultados obtenidos a este nivel mátrico de -30 kPa.

Los tratamientos expuestos a sequía -50 kPa registraron medias de producción en un rango de 0,17 t/ha de ms, para Mombasa PUD hasta 1,22 t/ha de ms, para la misma especie bajo PL; debido al estrés hídrico al que fueron sometidos los forrajes, se presentó una disminución considerable en la producción de biomasa. Dada esta condición, Sadras y Andrade (2000) mencionan que al presentarse una reducción en radiación interceptada (cubierta plástica), ante deficiencias hídricas se presenta una menor tasa de expansión de hojas y una mayor senescencia foliar y concluyen que la expansión de los tejidos es mucho más sensible a déficits hídricos que la fotosíntesis.

**3.2.6 Eficiencia de utilización de fósforo.** La figura 25 muestra los resultados del fósforo inicial (aplicado + existente) en el suelo para los tres ambientes en sus dos formas de incubación y cómo fue extraído por las plantas. El análisis presenta el fósforo fijado, distribuido en el forraje y el presente en el suelo denominado fósforo final.

Figura 25. Diagrama de barras para fósforo



Mientras las condiciones hídricas de los ambientes disminuían según los potenciales matriciales utilizados, las raíces de los forrajes aumentaron la asimilación de fósforo, siendo mayor en las plantas sembradas en fósforo localizado, ratificando lo reportado por (Rao et al., 1998), al tener las plantas el fósforo a disposición inmediata de las raíces. El fósforo encontrado en la parte aérea de las plantas fue mayor en condiciones hídricas favorables y fue disminuyendo a medida que fue disminuyendo el agua del suelo. La mayor concentración de fósforo se encontró en el forraje de las plantas cultivadas en fósforo localizado (PL) frente a las plantas cultivadas en el fósforo uniformemente distribuido (PD). La disponibilidad de agua afecta directamente la relación entre el crecimiento de la parte aérea y la raíz (Rao et al., 1999). La raíz continúa su desarrollo mientras que la parte aérea deja de crecer por causa del estrés. Así, las plantas son capaces de continuar el desarrollo de sus raíces en búsqueda de agua en zonas más profundas del suelo y junto a ella los nutrientes disponibles a esas profundidades (Potters et al., 2007).

Las pérdidas o no asimilación de fósforo presentadas en los ambientes con oferta hídrica 1 y 2 (-15 y -30 kPa) bajo fósforo localizado, fueron menos eficientes que el ambiente 3 (sequía) en su misma aplicación de fósforo, ya que este último tuvo menos del 80% de mineral no encontrado por laboratorio (macolla no analizada), mientras que los ambientes 1 y 2 registraron un 88% y 85,4% respectivamente de fósforo no determinado. Los ambientes 1 y 2 con plantas cultivadas sobre suelo con fósforo distribuido, presentaron pérdidas de 70%, 30% y 58,63%, respectivamente, de fósforo no encontrado en la macolla.

La eficiencia de utilización de fósforo se ve claramente reflejada en la forma como las raíces lo aprovecharon al tenerlo dispuesto de forma inmediata; esto constata lo anunciado por Rao (2001), cuando afirma que estos forrajes (género *Brachiaria* y *Megathyrus*), mejoran el proceso de absorción de nutrientes cuando se tienen las condiciones favorables para su asimilación; inversamente a lo que ocurre con el crecimiento de la parte aérea, el crecimiento radical generalmente se incrementa en proporciones similares, determinando un aumento de la relación raíz-parte aérea de la planta (Gales, 1979).

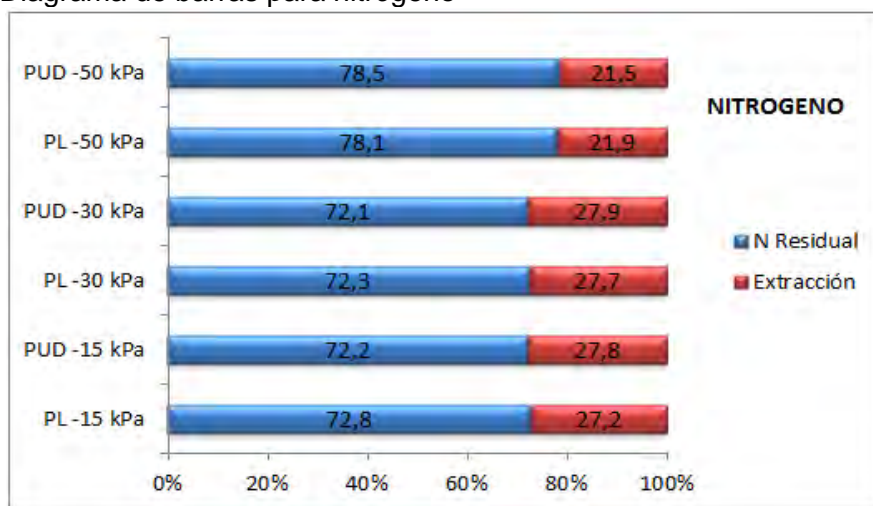
La modificación de la relación raíz-parte aérea se explicaría a partir del déficit hídrico, pues reduce el crecimiento aéreo con anticipación a la manifestación de reducciones en la capacidad fotosintética de las hojas Moreno (2009). Esto determina un incremento de asimilatos disponibles, que son utilizados en esta situación en mayor proporción para el crecimiento radical (Passioura, 1982).

### **3.3 EFICIENCIA DE UTILIZACIÓN DE NUTRIENTES (EUN) Y COEFICIENTE DE UTILIZACIÓN BIOLÓGICA (CUB)**

La prueba de ANOVA (Anexo I) realizada a los diferentes elementos, no arrojó diferencias estadísticas significativas ( $P>0,05$ ); la prueba de Tukey realizada a cada uno de los elementos tampoco presentó diferencias estadísticas ( $P>0,05$ ).

**3.3.1 Nitrógeno.** La figura 26 muestra los niveles de extracción de nitrógeno con PUD y PL en los potenciales -15, -30 y -50 kPa. El nitrógeno fue mayormente extraído en los potenciales de -15kPa y -30kPa. Según Cerón y Aristizábal (2012), esto se atribuye a la oferta hídrica y a la disponibilidad de nitrógeno (N) siendo el principal elemento, que junto con el fósforo (P) determinan el crecimiento vegetal en la etapa de establecimiento.

Figura 26. Diagrama de barras para nitrógeno



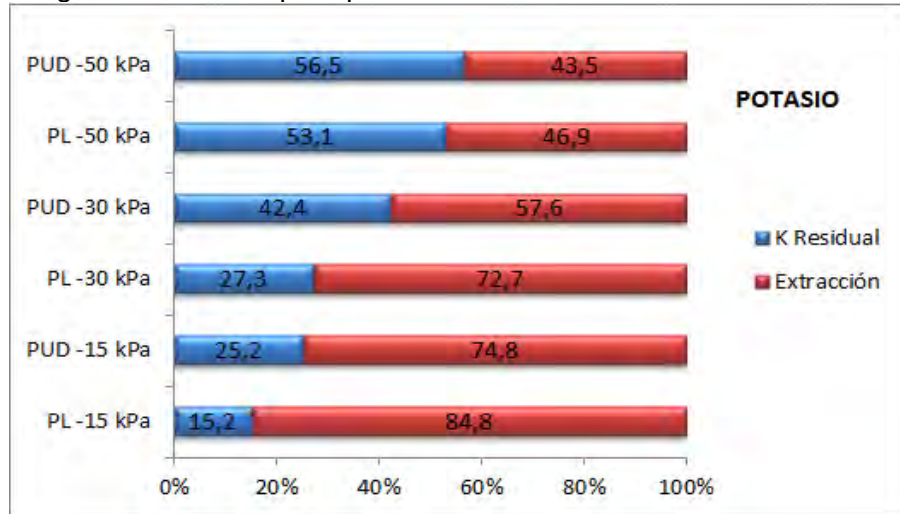
La menor extracción se dio a -50kPa (época de seca), esto se puede atribuir al estrés hídrico a que fueron sometidas; (Moreno, 2005), afirma que las condiciones de humedad en el suelo son necesarias para tener una nutrición nitrogenada balanceada en términos de la relación nitrato/amonio, que le permita alcanzar su máximo rendimiento y el mejor establecimiento de un cultivo a largo plazo.

El fósforo junto al nitrógeno son considerados como elementos básicos para la nutrición de plantas forrajeras, ya que desempeñan un papel directo en el metabolismo vegetal como conductor de energía y constituyente de compuestos orgánicos indispensables para la síntesis de proteínas, grasas y almidón (Mesa y Hernández, 1989). Esta situación se ve reflejada en las producciones promedio obtenidas en las especies evaluadas siendo de 2,18 y 1,09 t de ms/corte para todos los tratamientos a -15 y -30 kPa, respectivamente.

**3.3.2 Potasio.** Megda y Monteiro (2010), mencionan que el potasio es el segundo nutriente más extraído por las plantas después del nitrógeno y que se relaciona con los procesos fisiológicos y bioquímicos; además, muestra un efecto positivo en plantas fertilizadas, dada su alta respuesta en época lluviosa.

Al analizar los resultados de la figura 27, se puede observar que al inicio e instalación del estudio, el suelo presentaba un contenido de K de 403 mg/kg; la mayor extracción durante la etapa de establecimiento se presentó en un potencial de -15 kPa, donde la absorción del K por las gramíneas correspondió a un 84,8%, confirmando así la mayor disponibilidad del elemento cuando el suelo presenta la cantidad de agua suficiente, superando los niveles de capacidad de campo.

Figura 27. Diagrama de barras para potasio



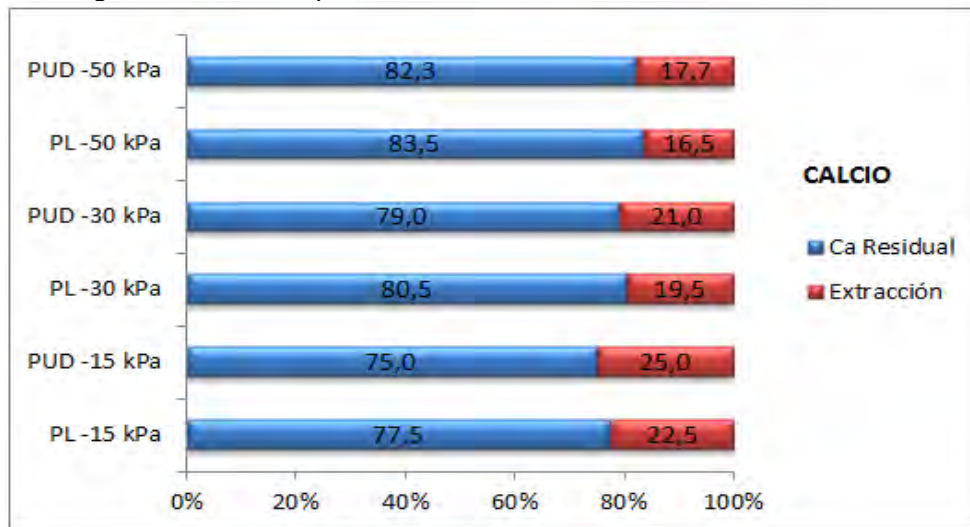
Cuando los cultivos se instalaron en un potencial hídrico de -30 kPa simulando la capacidad de campo, el porcentaje de extracción bajó a un 72,7%, y este a su vez disminuyó también en el potencial de -50 kPa (época de sequía) hasta un 43,5%. Según Marschner (2002), los contenidos y disponibilidad de agua en el suelo se constituyen un factor determinante para la absorción de los nutrientes por todos los cultivos.

En los tratamientos con PL a -15 kPa se presentaron los mejores resultados en producción de MS; esto confirma lo dicho por Marschner (2002), quien afirma que para un normal crecimiento de las plantas, se debe garantizar una concentración foliar de K entre 2 y 5%, ratificando al K como el elemento que después del nitrógeno es el más extraído por los pastos en la etapa de producción (Rincón y Ligarreto, 2008).

**3.3.3 Calcio.** Los porcentajes de extracción de calcio fueron mayores en las plantas sometidas a régimen de humedad -15 kPa y disminuyeron a medida que se redujo la oferta hídrica (-30 y -50 kPa); esto se atribuye a que el calcio es un nutriente pobremente distribuido dentro de la planta y que este hecho es debido en parte a un mecanismo de transporte por intercambio, el cual impide el transporte por el xilema por flujo de masas o difusión. Una vez depositado el calcio en la hoja, es incorporado en compuestos relativamente insolubles, de manera que su translocación por el floema es muy lenta o casi nula, aún en condiciones de un estrés hídrico acentuado de Ca. Debido a la dificultad

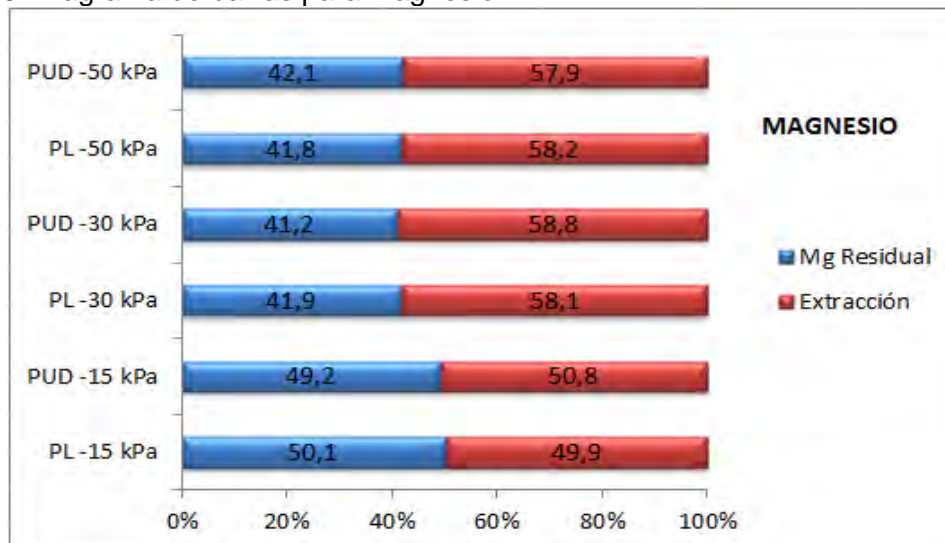
del transporte del calcio en la planta, los síntomas de deficiencia son comúnmente observados en los ápices de los tejidos vegetales, hojas jóvenes y brotes meristemáticos (Salinas, 1984). La figura 28 explica los contenidos menores de calcio en la planta a medida que fue sometida a periodos de sequía prolongada.

Figura 28. Diagrama de barras para calcio



**3.3.4 Magnesio.** En la figura 29 para el caso del Mg, se encontró que la mayor extracción del Mg se realizó cuando el suelo estaba con PUD (58,8%) y PL (58,1%) y -50 kPa; donde la extracción del Mg correspondió con PUD (57,9%) y PL (58,2%) pero a -15 kPa; la menor absorción del Mg por las plantas ocurrió para PUD (50,8%) y PL (49,9%). Esto pudo haberse dado porque a mayor humedad del suelo, la solución nutritiva es más enriquecida de nutrientes, facilitando la absorción de los mismos por el flujo de masas entre la solución del suelo y el sistema radicular de la planta.

Figura 29. Diagrama de barras para magnesio



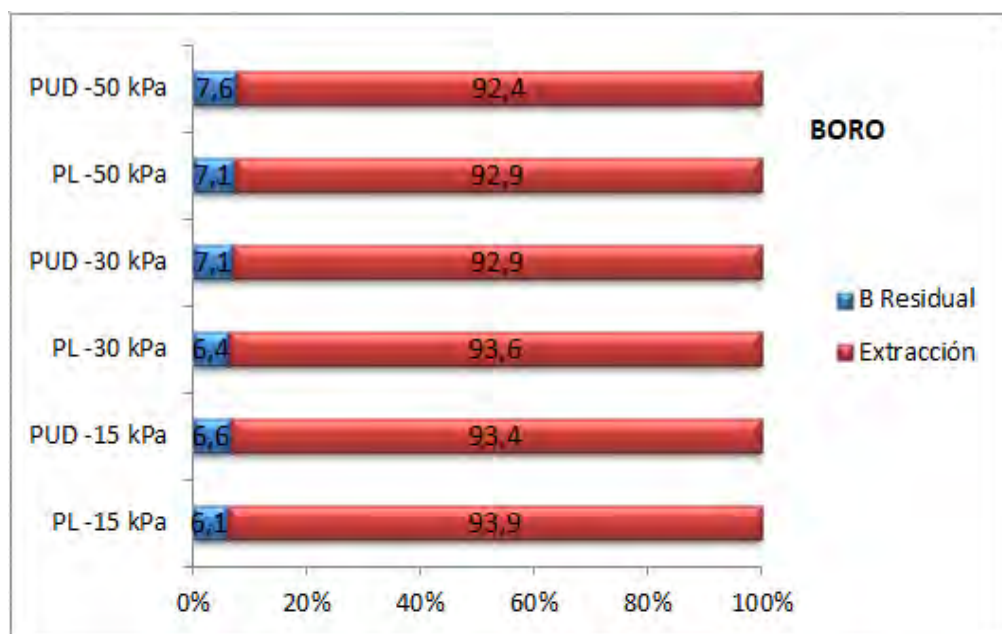


Ricaurte *et al.* (2007) encontraron que la aplicación de fertilizantes incrementa la biomasa del sistema radicular de varios genotipos de *Brachiaria* y al aumentar la oferta de Mg por encima de los niveles requeridos por los cultivos, pueden limitar el crecimiento y el Mg adicional se almacena principalmente en las vacuolas, el cual actúa como amortiguador para la homeostasis en el “pool metabólico”, como un criterio para la compensación de carga y para la osmorregulación de la vacuola, causando un desequilibrio de las relaciones Ca:Mg con la limitación del crecimiento por periodos cortos o largos según la condición climática, hasta volver a encontrar el equilibrio en la solución del suelo e iniciar nuevamente los procesos de intercambio, nutrición y acción fotosintética, que permiten un mejor desarrollo de los cultivos (Marschner, 2002). Estos procesos posiblemente pueden ayudar a explicar los cambios sucedidos durante el ensayo, los cuales afectaron el establecimiento de las gramíneas en la simulación del estrés hídrico a que fueron sometidas en el invernadero.

**3.3.5 Boro.** Este elemento está asociado a la utilización del calcio, nitrógeno y fósforo, de los azúcares y carbohidratos en la planta y promueve el crecimiento de las partes terminales de la planta.

Barker y Pilbeam (2007), afirman que las extracciones de boro en las monocotiledóneas, son menores a la de las dicotiledóneas con un rango entre 2 a 5 mg kg<sup>-1</sup>; este elemento, según la figura 30, fue extraído en los tres potenciales. Con fósforo localizado y distribuido en un promedio de 93%, se podría pensar que las necesidades de este elemento son más altas en los primeros estados de crecimiento, debido a que el B está involucrado en procesos de división celular (Barker y Pilbeam, 2007), fenómeno que predomina en las primeras etapas de crecimiento de las plantas. La absorción del B por las plantas depende solamente de su actividad (concentración) en la solución del suelo. La adsorción aumenta con el aumento del pH, temperatura y contenido de materiales adsorbentes y con la disminución de la humedad del suelo (Goldberg, 1977).

Figura 30. Diagrama de barras para boro



### 3.4 CORRELACIONES

En el cuadro 4 se muestran las correlaciones entre Vigor, Cobertura, Altura, MS e IAF.

Cuadro 4. Correlaciones de Pearson

		Vigor	Cobertura	Altura	FV	MS	IAF
Vigor	Correlación de Pearson	1	,433	,524	,496	,483	,681
	Sig. (bilateral)		,000	,000	,000	,000	,000
	N	216	216	216	144	144	72
Cobertura	Correlación de Pearson	,433	1	,446	,642	,501	,701
	Sig. (bilateral)	,000		,000	,000	,000	,000
	N	216	216	216	144	144	72
Altura	Correlación de Pearson	,524	,446	1	,583	,448	,644
	Sig. (bilateral)	,000	,000		,000	,000	,000
	N	216	216	216	144	144	72
FV	Correlación de Pearson	,496	,642	,583	1	,757	,922
	Sig. (bilateral)	,000	,000	,000		,000	,000
	N	144	144	144	144	144	72
MS	Correlación de Pearson	,483	,501	,448	,757	1	,890
	Sig. (bilateral)	,000	,000	,000	,000		,000
	N	144	144	144	144	144	72
IAF	Correlación de Pearson	,681	,701	,644	,922	,890	1
	Sig. (bilateral)	,000	,000	,000	,000	,000	
	N	72	72	72	72	72	72

\*\* La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral)

En este estudio, el IAF y vigor tuvo una relación moderadamente directa (0,681); existió una relación positiva entre IAF y cobertura, IAF y altura, y altamente positiva entre IAF y forraje verde, debido principalmente a la respuesta de las especies al cambio del régimen mátrico ofertado, en el que se evidencia la adaptación fisiológica y morfológica de las especies a cambios en el ambiente. Mejía (2007) afirma que las gramíneas al tener disponibilidad de fósforo en el suelo, tienen un incremento positivo en el crecimiento, desarrollo y vitalidad de la parte aérea; además, hay una relación positiva de IAF y MS, indicando que las especies incrementaron la producción de biomasa aérea en la medida que el suelo contenía más humedad.

Se pueden observar las correlaciones positivas entre todas las variables; las producciones de las especies estuvieron por debajo de los promedios con respecto a investigaciones realizadas en campo por Carrillo y Galíndez (2014); los factores como brillo solar, humedad del suelo, temperatura y altitud, pudieron influir directamente sobre los rendimientos y los contenidos nutricionales.

En gramíneas tropicales, según Rodríguez (2004), el óptimo período fotosintético se encuentra entre los 35 y 39°C, lo cual ocasionaría un aumento en la producción de forraje. Las altas temperaturas registradas bajo el invernadero se relacionan directamente con la producción de materia seca, los procesos bioquímicos y fisiológicos básicos relacionados con la síntesis, transporte y degradación de sustancias en las plantas y la relación que estas poseen con la cinética de las reacciones bioquímicas y el mantenimiento de la integridad de las membranas. Brito *et al.* (2014), en su estudio sobre *Ricinus cummunis* sometido a tres potenciales matriciales similares a los de este estudio, confirman que el desarrollo y crecimiento se ve afectado cuando se aumenta la tensión de agua en el suelo y condiciones de mayor estrés conducen a un crecimiento reducido y periodo vegetativo menor y por ende disminución en la producción; esta situación la presentaron las especies, cuando se hizo la correlación entre las variables y los potenciales matriciales aplicados al experimento.

#### 4. CONCLUSIONES

Las especies *Brachiaria* híbrido cv. Mulato II CIAT 36087, *Brachiaria* híbrido cv. Cayman, *Brachiaria brizantha* CIAT 26110 - Toledo y *Megathyrsus maximus* cv. Mombasa, presentaron su mayor rendimiento agronómico a -15 y - 30 kPa con respecto a vigor, cobertura y altura de la planta.

La producción de materia seca a -15 kPa fue mayor para la especie Cayman 4,55 t/ha con PUD; seguido de Toledo con 3,85 t/ha y PL; a - 30 Kpa el mayor fue Toledo con 2,27 ton de ms/ha en PL – PUD y a -50 kPa el mayor rendimiento lo presentó la especie Mombasa con 1,22 t/ha/corte y PL.

En el periodo de establecimiento bajo invernadero, las gramíneas presentaron la mayor eficiencia en extracción de nutrientes a un potencial de -15 kPa, con un porcentaje promedio para nitrógeno y potasio de un 52% en PL y PUD, mientras que la menor se presentó a -50 kPa con 36% y 34% en PL y PUD respectivamente.

## BIBLIOGRAFÍA

ABEL, A. y TICCONI, C. Phosphate sensing in higher plants. En: *Physiology Plantarum*, vol. 115, pág. 1-8. 2002.

AGUIRRE, J. y ZAVALA, A. Establecimiento y evaluación de la germinación, crecimiento, producción de biomasa y respuesta en la producción de leche de los pastos Mulato II (*Brachiaria* híbrido cv. CIAT 36087) y Cayman (*Brachiaria* híbrido cv. CIAT BR 02/1752) bajo condiciones del trópico seco. Honduras. 2014.

ALVES, V.M.C, PARENTONI, S.N., VASCONCELLOS, C.A. y PITTA, G.V.E. Cinética de absorção de fósforo e crescimento do sistema radicular de genótipos de milho contrastantes para eficiência a fósforo. En: *Rev. Brasileira de Milho e Sorgo*, vol. 1, no. 1, pág. 85-92. 2002.

ARAI, Y. and SPARKS, D. Phosphate reaction dynamics in soils and soil components: a multiscale approach. En: *Advances in Agronomy*, vol. 94, pág. 135-179. 2007.

AWASTHI, R.; TEWARI, R. and NAYYAR, H. Synergy between plants and P-solubilizing microbes in soils: effects on growth and physiology of crops. En: *International Research Journal of Microbiology*, vol. 2, no. 12, pág. 484-503. 2011.

BANERJEE, S.; PALIT, R.; SENGUPTA, C. y STANDING, D. Stress induced phosphate solubilization by *Arthrobacter* sp. and *Bacillus* sp. Isolated from tomato rhizosphere. En: *Australian Journal of crop science*, vol. 4, no. 6, pág. 378-383. 2010.

BARKER, A. y PILBEAM, D. *Handbook of plant nutrition*. CRC press Taylor & Francis group. New York. pag. 613. 2007.

BATES, T., LYNCH, J. The efficiency of *Arabidopsis thaliana* (Brassicaceae) root hairs in phosphorus acquisition. *American Journal of Botany*. 87: pag.964-970. 2000.

BETANCOURT, J.G. y VALENCIA, M. Evaluación agronómica de siete variedades de gramíneas en la vereda El Tablón Municipio de Popayán. Trabajo de grado Ingeniería Agropecuaria. Universidad del Cauca. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Popayán, Cauca. 2011.

BRITO, M.; BRIXNER, G.; SILVA, S. y PENNING, L.; REISSER, C.; TIMM, L.; Desarrollo y crecimiento inicial de la higuera (*Ricinus communis*) sometida a diferentes tensiones de agua en el suelo. En: *Agrociencia*, vol. 48, no. 5, 2014.

BRUULSEMA, T.W.; FIXEN, P.E. and SNYDER, C.S. Fertilizer nutrient recovery insustainable cropping systems. En: Better Crops, vol. 88, no. 4, pág.15-17. 2004.

CARRILLO, S. y GALÍNDEZ J. Evaluación en la fase de establecimiento de parcelas demostrativas con asociaciones forrajeras para sistemas de pastoreo en el valle del Patía. Popayán: 2014.

CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL (CIAT). Programa de Pastos Tropicales. Informe anual. Cali, Colombia 2004.

CERÓN, L. y ARISTIZÁBAL, F. Dinámica del ciclo del nitrógeno y fósforo en suelos. En: Revista colombiana de Biotecnología, vol. 14, no. 1, pág. 285-295. 2012.

CHAVES M. Effects of Wather Deficits on Carbon Assimilation. En: Journal of Experimental Botany, vol. 42, pág.1-16, 1991.

CHAVES M.; MAROCO J.; PEREIRA J. Understanding plant Responses to Drought: From Genes to the Whole Plant. En: Funct. Plant Biol., vol. 30, pág. 239-264, 2003.

CIAT-CORPOICA. Pasto Toledo (*Brachiaria brizantha* CIAT 26110) Gramínea de crecimiento vigoroso para intensificar la ganadería colombiana. Cali, Colombia. 2002.

CIAT. Cultivar Mulato II (*Brachiaria híbrido* CIAT 36087): Gramínea de alta calidad y producción forrajera, resistente a salivazo y adaptada a suelos tropicales ácidos bien drenados. Cali, Colombia: 2007.

CAN. CLIMATE ACTION NETWORK INTERNATIONAL (Degradación del suelo. 2008. Disponible en: [http://gruporeddperu.net/biblioteca/index.php?option=com\\_docman&task=doc\\_details&gid=548&tmpl=component&Itemid=94](http://gruporeddperu.net/biblioteca/index.php?option=com_docman&task=doc_details&gid=548&tmpl=component&Itemid=94)

COLABELLI A. y MAZZANTI, L. Efecto de factores controlables sobre la expansión del área foliar. 1998.

DAUBENMIRE, R.F.. *Ecología Vegetal*. Tratado de Autoecología de las Plantas. Tercera Edición. Edit. Limusa. México. 1999

DOBERMANN, A. Nutrient use efficiency-measurement and management. Proc. of International Fertilizer Industry Association (IFA) Workshop on Fertilizer Best Management Practices. Brussels, Belgium: pág. 7-9.2007.

DANE. ENCUESTA NACIONAL AGROPECUARIA ENA-2012. Boletín de prensa Bogotá: 2012. Disponible en internet en: [https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/enda/ena/boletin\\_ena\\_2012.pdf](https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/enda/ena/boletin_ena_2012.pdf)

ESTRADA ALVARES, J. Pastos y forrajes del trópico Colombiano. Editorial Universidad de Caldas. 1a. ed. Manizales- Colombia: 2001.

FREIRE, F.J. Sistema para cálculo do balanço nutricional e recomendação de corretivos e fertilizantes para cana-de-açúcar. Tese Doutorado em Ciência do solo. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa: 2013.

GALES, U. Effects Of Water Supply On Partitioning Of Dry Matter Between Roots And Shoots In *Lolium perenne*. 1979.

GARCÍA, J. El uso eficiente de nutrientes- una necesidad mundial. Congreso Nacional de cerealistas y leguminosas (21: Fenalce. Bogotá, D.C.: 2008).

GOLDBERG, S. Chemistry and mineralogy of born insoils. In: Gupta, U. C. (ed.). Boron and its role in crop production. Boca Raton: CRC Press, pág. 3-44. 1977.

GUENNI, O.; GIL, J. Respuestas al déficit hídrico en especies forrajeras de brachiara (trin.) Griseb. (Poaceae). Caracas, Venezuela. 2006.

IDEAM INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES DE COLOMBIA. Pronóstico del clima para Colombia. Información general [en línea]. Ideam ®. Bogotá D.C. 2013 [citado marzo, 2015]. Disponible en internet en: <http://www.pronosticosyalertas.gov.co/web/tiempo...clima> de las diferentes regiones del país.

IGAC INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI. Estudio general de suelos y zonificación de tierras. Departamento del Cauca. Popayán: 2009, pág. 556. ISBN: 978-958-8323-31-.

KEPHART, K.D.; BUXTON, D.R. Forage quality responses of C3 and C4 perennial grasses to shade. En: Access Alliance of Crop, Soil, and Environmental Science Society, 1992, vol.33, no. 4, pág. 831-837.

LACERDA, H.; GUERRA, B. y JÚNIOR. GInfluência do déficit hídrico e da matéria orgânica do solo no crescimento e desenvolvimento da mamoneira BRS 188-Paraguaçu. En: Rev. Bras. Ciencia Agrar., vol. 4, pág. 440-447. 2009.

LARA, M.E. Evaluación de adaptación y producción de biomasa de nueve gramíneas forrajeras mejoradas. Tesis Ingeniero Agrónomo Zootecnista. Universidad de San Carlos de Guatemala. Centro Universitario de Petén. Petén, Guatemala: pag31-32-33-39-41-43-45-47-48. 2005. Disponible en internet: [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/26/26\\_0036.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/26/26_0036.pdf)

LUDLOW, M. Strategies of response to wather stress. Structural and functional responses to environmental stresses: Wather shortage. SPB. La Haya, Holanda. pág. 279-281. 1989.

MARSCHNER, H. Mechanisms of adaptation of plants to acid soils. Plant and soil, 134: pag 1-20. 1991.

MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press. Londres: 2002.

MEGDA, M. y MONTEIRO, F. Nitrogen and potassium supply and the morphogenic and productive characteristics of marandu palisa degrass. En: R. Bras. Zootec., vol. 39, no. 8, pág. 1666-1675. 2010.

MEJÍA, S. Caracterización de dos Gramíneas Forrajeras de *Brachiaria* (*B. Decumbens* y *B. Ruziziensis*) y sus recombinantes genéticos por su adaptación a suelos con bajo fósforo disponible y alta saturación de aluminio. 2007.

MENDES, L.C. Eficiência nutricional nos cultivares de cana-de açúcar. 2006. Disponible en internet en: [http://www.tede.ufv.br/tedesimplificado/tde\\_arquivos/18/TDE-2006-1213T150312Z-160/Publico/texto%20completo.pdf](http://www.tede.ufv.br/tedesimplificado/tde_arquivos/18/TDE-2006-1213T150312Z-160/Publico/texto%20completo.pdf)

MESA, A.R. y HERNÁNDEZ, M. Fertilización Fosfórica en Pastos Tropicales. Pastos y Forrajes. 1989.

MORENO, P. Respuesta de las plantas al estrés por déficit hídrico. Una revisión. Departamento de Agronomía. Facultad de Agronomía. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá: 2009.

NILSEN, E.T. y D.M. ORCUTT. Physiology of plants under stress. Abiotic factors. John Wiley and Sons, New York, NY: 1996.

OLIVERA, Y. Selección de accesiones de *Brachiaria spp* en suelos de mal drenaje y mediana fertilidad [en línea]. Tesis de Maestría en Pastos y Forrajes. Estación experimental de pastos y forrajes Indio Hatuey. Universidad de Matanzas: 2004 Disponible en: <http://biblioteca.eepfih.cu/>.



OLIVERA, Y.; MACHADO, R. y DEL POZO, P. Características botánicas y agronómicas de especies forrajeras importantes del género *Brachiaria*. En: Pastos y Forrajes, 2006, vol. 29, no. 1.

PASSIOURA, J.B. Water in the soil-plant-atmosphere continuum. Encyclopedia of plant. pág. 30-33. 1982.

PETERS M; FRANCO, L.H.; SCHMIDT, A.; HINCAPIÉ, B. Especies forrajeras multipropósito: opciones para productores de Centroamérica. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Publicación no. 333. Cali, Colombia: 2003.

\_\_\_\_\_; \_\_\_\_\_; \_\_\_\_\_; \_\_\_\_\_. Especies forrajeras multipropósito: opciones para productores del Trópico Americano. Centro Internacional de Agricultura Tropical CIAT. Publicación no. 374. Cali, Colombia: 2011.

\_\_\_\_\_; VIVAS, N.; RENDÓN, E.; MORALES, S.; HINCAPIÉ, B y ORDOÑEZ, K. Alternativas forrajeras para el trópico bajo. Cauca Colombia: 2013.

POTTERS, G.; PASTERNAK, T.; GUISEZ, Y; PALME, K y JANSEN, M. Stress-induced morphogenic responses: growing out of trouble? En: Trends Plant Sci., vol.12, no. 3, pág. 99-105. 2007.

POT PLAN DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL Información general. Patía: 2009. Disponible en internet en: <http://www.patia-cauca.gov.co/nuestromunicipio.shtml?apc=m11l--&m=f&s=m#geografia>

RAO, I.M. Adapting tropical forage to low-fertility soils. En: International Grassland Congress (19: Sao Paulo, Brazil: 11-21, febrero, 2001b), pág. 249. 2001.

\_\_\_\_\_ y TERRY, N. The role of phosphorus in photosynthesis. En: M. Pessaraki, Ed. Handbook of Photosynthesis. Marcel Dekker, Inc. New York: 1996.

\_\_\_\_\_; FRIESEN, D. y OSAKI, M. Plant adaptation to phosphorus-limited tropical soil. En: M. Pessaraki, Ed. Handbook of plant and crops stress. Second edition. Marcel Dekker, Inc. New York: 1999.

\_\_\_\_\_; MILES, J.W. y GRANOBLES, J.C. Differences in tolerance to infertile acid soil stress among germplasm accessions and genetic recombinants of the tropical forage grass genus, *Brachiaria*. En: Field Crops Research, vol. 59, pág. 43-52. 1998.

RICAURTE, J., RAO, I. y MENJIVAR, J. Estrategias de enraizamiento de genotipos de *Brachiaria* en suelos ácidos y de baja fertilidad en Colombia. Colombia. En: Acta agronómica, vol. 56, no. 3, pág. 107-115. 2007.

RINCÓN, A.; LIGARRETO, G. Fertilidad y extracción de nutrientes en la asociación maíz pastos en suelos ácidos del piedemonte Llanero de Colombia. En: Agronomía Colombiana, vol. 26, no. 2, pág. 322-331. 2008.

RODRIGUEZ, P. Bases ecofisiológicas para el manejo de los pastos tropicales. 2004. Disponible en [http://www.producción-animal.com.ar/producción\\_y\\_manejo\\_pasturas/pastoreo](http://www.producción-animal.com.ar/producción_y_manejo_pasturas/pastoreo)

ROJAS, J. y MORENO, N. Producción y formulación de prototipos de un biofertilizante a partir de bacterias nativas asociadas al cultivo de arroz (*Oryza sativa*). En: Rev. Colomb. Biotecnol., vol. 10, no. 2, pág. 50-62. 2008.

ROONEY, D. y CLIPSON, N. Phosphate addition and plant species alters microbial community structure in acidic upland grassland soil. En: Microb. Ecol., vol. 57, 2009.

RUBIO, G. Conectando el fósforo del suelo con la planta. En: Informaciones agronómicas del cono sur, vol. 16, pág. 19-23. 2002.

SADRAS, V. y ANDRADE, F. Efectos de la sequía sobre el crecimiento y rendimiento de los cultivos. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soya. 2002.

SCHAFFERT, R. E., ALVES, V. M. C., PITTA, G.V.E., BAHIA F.C., Genetic variability in sorghum for P efficiency and responsiveness. In: Developments in plant and soil sciences. Plant Nutrition. Netherlands, pág.71-73. 2002.

SALINAS, J.G Requerimientos nutricionales de pastos tropicales. CIAT. Pág. 10-21. 1984.

SEGURA, D y LEGARDA, JD. Respuesta Agronómica de ocho variedades de gramíneas en tres ambientes del valle del Patía-Cauca. Trabajo de grado Ingeniería Agropecuaria. Universidad del Cauca. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Popayán. Cauca. 2011.

SHARPLEY, A. Phosphorus availability. En: Handbook of soil sciences, vol. 2, pág. 11.14 – 11.37. 2012.

SIERRA, J. Fundamentos para el establecimiento de pasturas y cultivos forrajeros. Editorial Universidad de Antioquia. 2a. ed. Serie Ciencia y Tecnología. Medellín: 2005.

STEWART, W. Consideraciones en el uso eficiente de nutrientes. 2015.

SYLVIA, M.; FUHRMANN, J.; HARTEL, P. and ZUBERER, D. Principles and applications on soil microbiology. Second Edition. Prentice Hall. New Jersey: pag. 640. 1995.

TIESSEN, H. Phosphorus in the global environment. En: The ecophysiology of plant-phosphorus interactions. Springer, pág. 1-7. 2008.

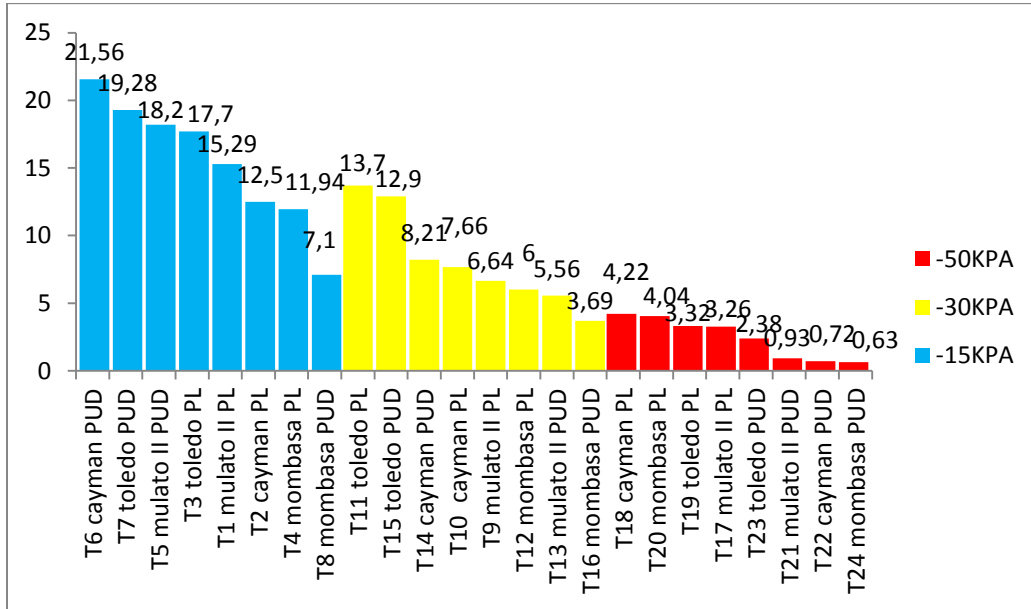
TOLEDO, J. Manual para la evaluación Agronómica. CIAT. Red Internacional de Pastos Tropicales. Cali: 1982.

VALENZUELA, I. y TORRENTE, A. Ciencia del suelo, principios básicos. Física de suelos. 2 ed. Sociedad colombiana de la ciencia del suelo: pág. 144, 154, 159, 161, 167, 173. 2013.

WARNOCK, R. Área foliar, componentes del área foliar y rendimiento de seis genotipos de caraota. Venezuela: 2005.

# ANEXOS

## ANEXO A. FORRAJE VERDE



## ANEXO B. ANOVA PARA VIGOR

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
Especie	3	1.81944444	0.60648148	0.62	0.6031
Fosforo	1	1.12500000	1.12500000	1.16	0.2874
especie*fosforo	3	0.81944444	0.27314815	0.28	0.8389
Potencial	2	1.86111111	0.93055556	0.96	0.3912
especie*potencial	6	2.80555556	0.46759259	0.48	0.8192
especi*fosfor*potenc	6	1.47222222	0.24537037	0.25	0.9560

## ANEXO C. ANOVA PARA COBERTURA

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
especie	3	4426.59722	1475.53241	3.23	0.0306
potencial	2	22590.75000	11295.37500	24.70	<.0001

### C1: TUKEY especie

Means with the same letter are not significantly different.				
Tukey Grouping	Mean	N	Cultivar	
A	61.444	18	3	
A				
B	50.389	18	2	
B				
B	45.444	18	4	
B				
B	40.222	18	1	

### C2: TUKEY potencial

Means with the same letter are not significantly different.				
Tukey Grouping	Mean	N	potencial	
A	72.000	24	15	
B	47.375	24	30	
C	28.750	24	50	

### ANEXO D. ANOVA PARA ALTURA

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
Especie	3	4506.81944	1502.27315	3.07	0.0364
potencial	2	19015.86111	9507.93056	19.45	<.0001

#### D1: TUKEY especie

Means with the same letter are not significantly different.				
Tukey Grouping	Mean	N	cultivar	
A	59.444	18	3	
A				
B	47.056	18	2	
B				
B	43.611	18	1	
B				
B	37.833	18	4	

### ANEXO E. ANOVA PARA INDICE DE ÁREA FOLIAR

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
especie	3	40.9978282	13.6659427	9.00	<.0001
potencial	2	182.4544965	91.2272483	60.07	<.0001
especie*potencial	6	21.2650333	3.5441722	2.33	0.0466

#### E1: Tukey especie

Means with the same letter are not significantly different.				
Tukey Grouping	Mean	N	especie	
A	3.6848	18	3	
B	2.5516	18	1	
B				
B	2.4991	18	2	
B				
B	1.5553	18	4	

#### E2: Tukey potencial

Means with the same letter are not significantly different.				
Tukey Grouping	Mean	N	potencial	
A	4.5037	24	15	
B	2.6094	24	30	
C	0.6049	24	50	

**E3: Especie Potencial**

T Comparison Lines for Least Squares Means of especie*potencial						
LS-means with the same letter are not significantly different.						
			IAF LSMEAN	cultivar	potencial	LSMEAN Number
	A		5.20391317	3	15	7
	A					
	A		5.16421620	1	15	1
	A					
	A		4.76892191	3	30	8
	A					
	A		4.54366841	2	15	4
	B		3.10309441	4	15	10
	B					
C	B		2.56188811	2	30	5
C						
C	D		1.65415793	1	30	2
C	D					
C	D	E	1.45269522	4	30	11
	D	E				
	D	E	1.08146562	3	50	9
	D	E				
	D	E	0.83649767	1	50	3
	D	E				
	D	E	0.39168998	2	50	6
		E				
		E	0.11011364	4	50	12

**ANEXO F. ANOVA PARA MATERIA SECA (MS)**

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
Potencial	2	2838.194444	1419.097222	18.59	<.0001

**F1: Potencial**

Means with the same letter are not significantly different.			
Tukey Grouping	Mean	N	Potencial
A	18.542	24	15
B	8.958	24	30
B			
B	3.333	24	50

### ANEXO G. ANÁLISIS DE SUELO INICIAL

Muestra	Descripcion	pH (Un)	MO (g/Kg)	P-Brayll (mg/Kg)	Ca (cmol/Kg)
1	Muestra Patia	6,57	31,54	6,42	7,92

Mg (cmol/Kg)	K (cmol/Kg)	Al (cmol/Kg)	B (mg/Kg)	Fe (mg/Kg)
3,33	0,35	0,00	0,95	33,68

### ANEXO H. ANÁLISIS DE SUELO FINAL

		Procedencia Patia			
Muestra	Descripcion	pH (Un)	MO (g/Kg)	P-Brayll (mg/Kg)	Ca (cmol/Kg)
1	-15 KPa P Localizado	6,43	25,45	101,83	9,51
2	-15 KPa P Uniformemente distr.	6,63	22,32	72,09	9,19
3	-30 KPa P Localizado	7,24	23,8092	97,6394	10,2447
4	-30 KPa P Uniformemente distr.	7,91	22,7258	99,8378	9,6906
5	-50 KPa P Localizado	8,5	23,3573	130,1477	8,1937
6	-50 KPa P Uniformemente distr.	8,26	23,774	97,7356	10,091

#### Entrega Resultados Jun 24 del 2015

Mg (cmol/Kg)	K (cmol/Kg)	Al (cmol/Kg)	B (mg/Kg)	Fe (mg/Kg)
4,26	0,16	0,00	3,57	83,08
4,45	0,26	0	3,882	106,6514
4,1885	0,2818	0	3,7391	68,752
3,7942	0,4381	0	4,155	67,5759
3,8492	0,5483	0	4,168	68,8267
4,2248	0,5827	0	4,4928	69,3152



## ANEXO I. ANOVA NUTRIENTES

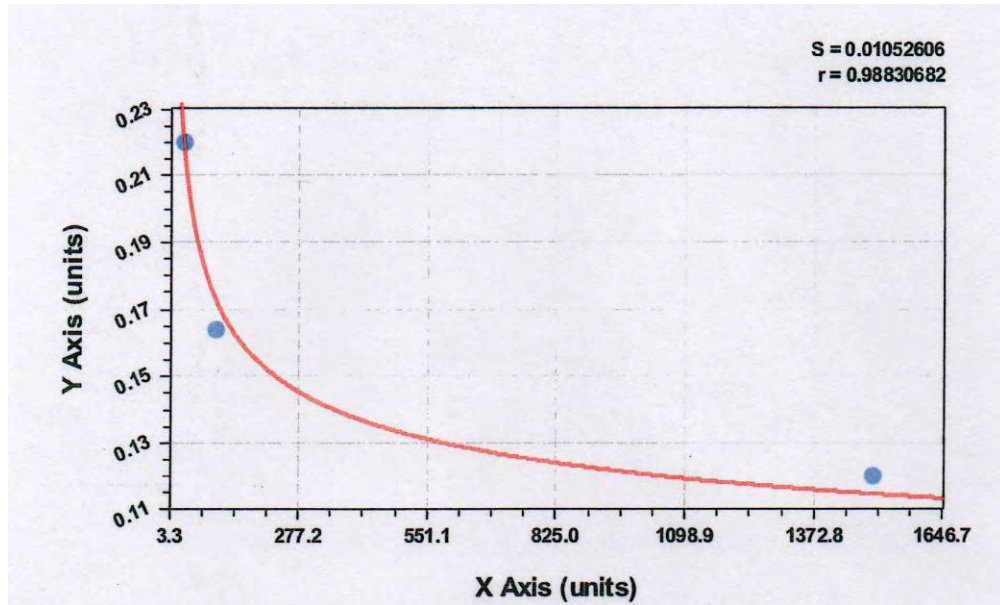
		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Nitrógeno	Inter-grupos	43,440	5	1,889	2,472	0,630
	Intra-grupos	146,667	42	,764		
	Total	190,106	47			
Calcio	Inter-grupos	56,759	5	14,120	2,477	0,223
	Intra-grupos	149,333	42	3,424		
	Total	206,092	47			
Boro	Inter-grupos	112,656	5	158,159	4,998	1,443
	Intra-grupos	406,333	42	52,158		
	Total	518,989	47			
Magnesio	Inter-grupos	38,811	5	16,383	2,913	0,896
	Intra-grupos	99,544	42	1,063		
	Total	138,355	47			
Potasio	Inter-grupos	27,824	5	11,775	1,857	0,944
	Intra-grupos	172,866	42	1,518		
	Total	200,69	47			
Hierro	Inter-grupos	270,824	5	15,775	1,157	1,112
	Intra-grupos	72,866	42	1,518		
	Total	343,691	47			

## ANEXO J. TABLA NUTRIENTES-CUB

Descripción	N (mg/Kg)	Ca (mg/Kg)	Mg (mg/Kg)	K (mg/Kg)	B (mg/Kg)	Cu (mg/Kg)
Muestra inicial	6308,00	2453,06	1124,59	403,79	58,73	20,23
PL-15 kPa	5089,60	1902,00	519,62	61,31	3,57	4,19
Utilizado	1218,40	551,06	604,97	342,49	55,16	16,05
Muestra inicial	6308,00	2453,06	1124,59	403,79	58,73	20,23
PUD -15 kPa	4463,86	1838,76	543,17	101,82	3,88	4,84
Utilizado	1844,14	614,30	581,42	301,97	54,85	15,39
Muestra inicial	6308,00	2453,06	1124,59	403,79	58,73	20,23
PL -30 kPa	4761,84	2048,94	511,00	110,18	3,74	2,69
Utilizado	1546,16	404,12	613,59	293,61	54,99	17,54
Muestra inicial	6308,00	2453,06	1124,59	403,79	58,73	20,23
PUD -30 kPa	4545,16	1938,12	462,89	171,30	4,16	2,47
Utilizado	1762,84	514,94	661,70	232,49	54,58	17,76
Muestra inicial	6308,00	2453,06	1124,59	403,79	58,73	20,23
PL -50 kPa	4671,46	1638,74	469,60	214,39	4,17	2,18
Utilizado	1636,54	814,32	654,99	189,40	54,56	18,05
Muestra inicial	6308,00	2453,06	1124,59	403,79	58,73	20,23
PUD -50 kPa	4754,80	2018,20	515,43	227,84	4,49	3,09
Utilizado	1553,20	434,86	609,16	175,95	54,24	17,14

## ANEXO K. CURVAS SUELOS PATÍA

Curva Logarítmica Recíproca



Reciprocal Logarithm Fit:  $y=1/(a+b*\ln(x))=H_2O=1/(a+b*\ln(Pot))$

Coefficient Data:

a=1,0568489

b=1,0207089

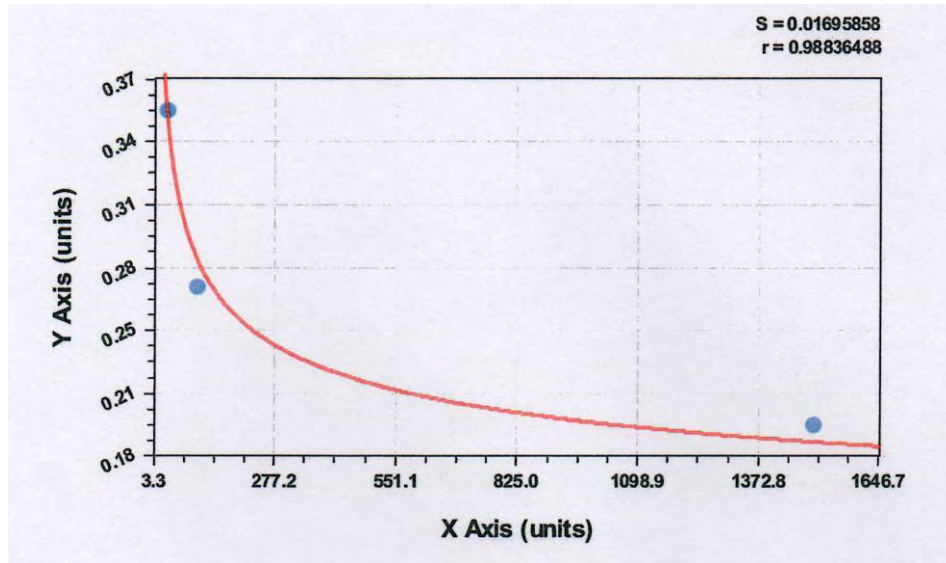
Reciprocal Logarithm Fit:  $y=1/(a+b*\ln(\Omega))$

Standard Error: 0,0105261

Correlation Coefficient: 0,9883068

Comments: The fit converged to a tolerance of 1e-006 in 2 iterations. No weighting used.

SITIO PATÍA 2



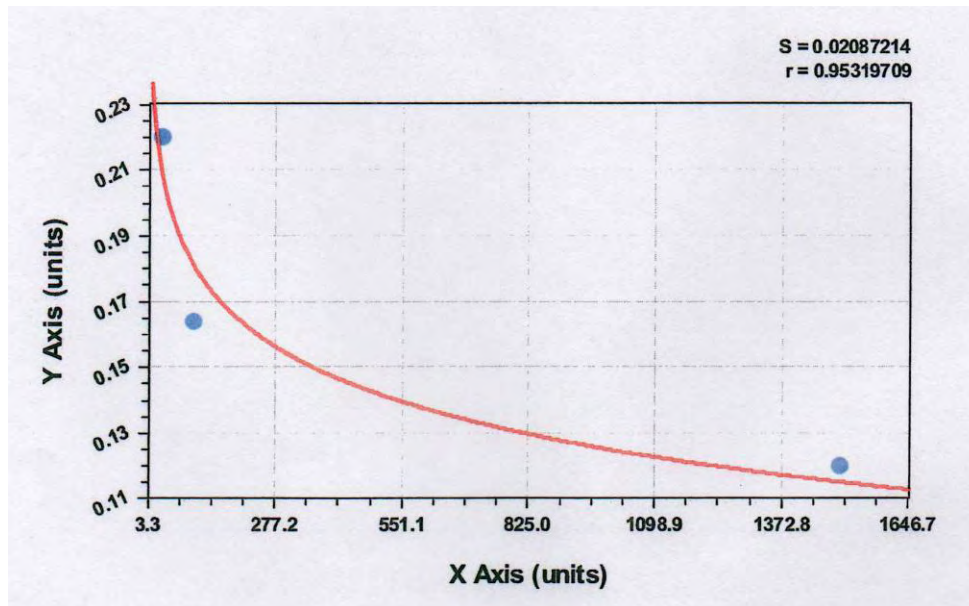
Reciprocal Logarithm Fit:  $y=1/(a+b*\ln(x))=H_2O=1/(a+b*\ln(Pot))$

Coefficient Data:

a=0,6565649

b=0,63086339

MODELO LOGARÍTMICO



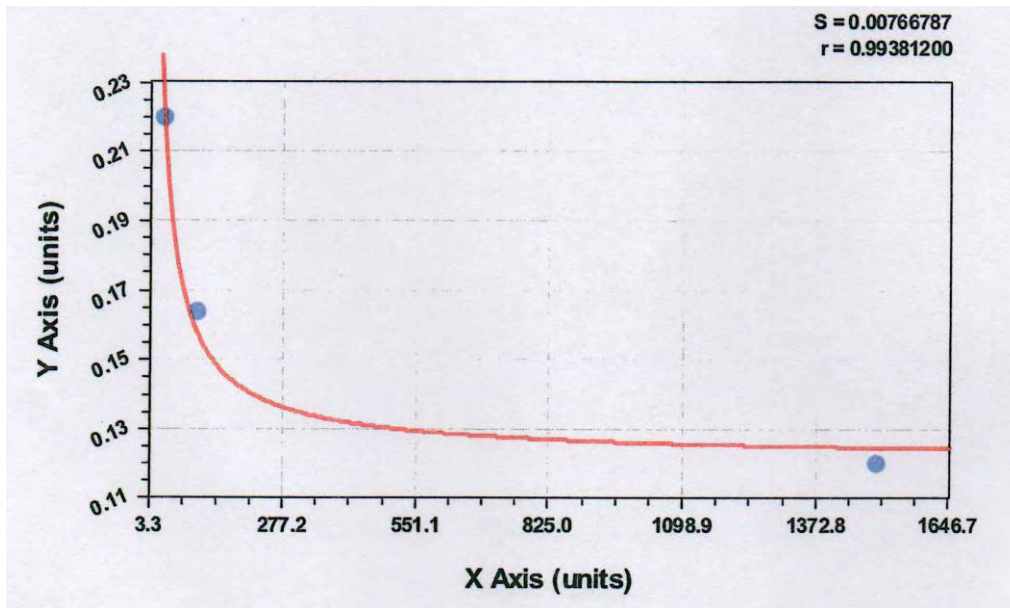
Logarithm Fit:  $y=a+b*\ln(x)=H_2O=a+b*\ln(Pot)$

Coefficient Data:

a=0,29109856

b=-0,023698217

CURVA CÁLCULO DE AGUA  
Modified Geometric Fit



Valores de curva

x	y
33	0,21999
100	0,1654
1500	0,1226

Modified Geometric Fit:  $a \cdot x^{(b/x)} = H_2O = a \cdot (pot)^{(b/(pot))}$

Coefficient Data:

a=0,12368619

b=5,5096894

## ANEXO L. CÁLCULO ALTURA DE COLUMNA (cm)

Potencial kPa	a	b		Agua kg/kg	Agua (mL)	Agua (mL) vaso (5kg)	Altura colum cm
5	0,12577122	3,1895853	0,63791706	0,7637	764	3818	4
10	0,12577122	3,1895853	0,31895853	0,4447	445	2224	8
15	0,12577122	3,1895853	0,21263902	0,3384	338	1692	12
20	0,12577122	3,1895853	0,15947927	0,2853	285	1426	16
25	0,12577122	3,1895853	0,12758341	0,2534	253	1267	20
15	0,12577122	3,1895853	0,21263902	0,3384	338	1692	12
35	0,12577122	3,1895853	0,09113101	0,2169	217	1085	28
40	0,12577122	3,1895853	0,07973963	0,2055	206	1028	32
45	0,12577122	3,1895853	0,07087967	0,1967	197	983	36
30	0,12577122	3,1895853	0,10631951	0,2321	232	1160	24
55	0,12577122	3,1895853	0,05799246	0,1838	184	919	44
60	0,12577122	3,1895853	0,05315976	0,1789	179	895	48
65	0,12577122	3,1895853	0,04907054	0,1748	175	874	52
50	0,12577122	3,1895853	0,06379171	0,1896	190	948	40

Potenciales de estudio

Curva Hyperbólica

$$\text{Fit} = Y = (a + (b/X))$$

$$H_2O = (0,12577122 * (3,1895853 / \text{pot}))$$

$$r = 0,99$$

Cálculo altura de columna en cm:

$$\text{Altura de columna: } H = -T = -(12,6 h - h_1 - h_2)$$

$$\text{para } 5\text{kPa} = -50 \text{ cm} = 12,6 h - 0 - 0$$

$$\text{Despejando: } h = -50 \text{ cm} / -12,6 = 3,97 \text{ SIU} = 4 \text{ cm}$$