

UNIVERSIDAD NACIONAL  
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y MAR  
ESCUELA CIENCIAS AGRARIAS  
LICENCIATURA EN AGRONEGOCIOS

Determinación de la curva de extracción de nutrimentos de los frutos de café (*Coffea arabica* L.) en el cultivar Obatá, en la zona de Los Santos

Trabajo final de graduación bajo la modalidad de tesis de grado sometida a consideración del Tribunal Examinador de la Escuela de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional para optar al grado de Licenciatura en Ingeniería en Agronomía

Bach. Alberto Navarro Mora

Heredia, Costa Rica

2022

Trabajo final de graduación presentado como requisito parcial para optar al grado de Licenciatura en  
Ingeniería Agronómica

Tribunal Examinador

---

Dr. Roger Muñoz Hernández

Representante de la Decana de Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar

---

M Sc. Andrés Alpízar Naranjo

Director Escuela de Ciencias Agrarias

---

M. Sc. Fernando Mojica Betancur

Tutor de Tesis

---

M. Sc. Alejandro Vargas Martínez

Asesor

---

Lic. Víctor Chaves Arias

Asesor



---

Bach. Alberto Navarro Mora

Postulante

## **Dedicatoria**

A mi madre, Ana Lía Mora Chinchilla, a mi padre, Marvin Navarro Cascante, y a hermano, Octavio Navarro Mora, quienes incondicionalmente me han apoyado siempre para llegar donde estoy.

## **Agradecimientos**

A mi tutor, M. Sc. Fernando Mojica Betancur, por su gran apoyo, conocimiento y asesoramiento.

Al Lic. Víctor Chávez Arias, por su conocimiento y gran aporte a este trabajo.

Al profesor, M. Sc. Alejandro Vargas Martínez, por su asesoramiento, apoyo y colaboración.

Al M. Sc. Carlos Acuña Matamoros, por su asesoramiento, apoyo y colaboración.

Al ICAFE (Instituto del Café de Costa Rica), por la disposición de sus laboratorios, colaboración, orientación con el uso del equipo y resultados.

A la UNA (Universidad Nacional de Costa Rica), que me dio amigos, experiencias y de donde me llevaré muchos de los mejores recuerdos de mi vida.

A todas aquellas personas, familiares, amigos, profesores y compañeros que fueron parte de este proceso de mi formación personal y académica y que, de alguna forma, contribuyeron con este proyecto.

## Índice

|  |   |
|--|---|
| Capítulo I. Introducción .....   | 1 |
| 1.1. Objetivos.....  | 3 |
| 1.1.1. Objetivo general.....   | 3 |
| 1.1.2. Objetivos específicos .....   | 3 |
| Capítulo II. Marco teórico.....  | 4 |
| 2.1. Importancia del cultivo del café y aspectos generales.....                            | 4 |
| 2.1.1. Taxonomía y morfología del café .....   | 5 |
| 2.1.2. Especies y cultivares .....   | 6 |
| 2.2. Condiciones climáticas .....  | 6 |
| 2.2.1. Temperatura .....   | 6 |
| 2.2.2. Precipitación .....   | 6 |
| 2.2.3. Humedad relativa.....   | 7 |
| 2.2.4. Luz solar .....   | 7 |
| 2.3. Condiciones edáficas .....  | 7 |
| 2.3.1. Relieve .....   | 7 |
| 2.3.2. Profundidad efectiva .....  | 8 |
| 2.4. Manejo del cultivo relacionado con la fertilidad del café en el ámbito nacional ..... | 8 |
| 2.5. Elementos esenciales para la nutrición del café .....                                 | 8 |
| 2.5.1. Macronutrientes primarios.....  | 9 |

|   |    |
|---|----|
| 2.5.2. Macronutrientes secundarios .....                                  | 9  |
| 2.5.3. Micronutrientes.....   | 9  |
| 2.6. Función de los nutrientes.....                                       | 9  |
| 2.6.1. Nitrógeno .....  | 9  |
| 2.6.2. Fósforo .....  | 10 |
| 2.6.3. Potasio.....   | 10 |
| 2.6.4. Calcio .....   | 10 |
| 2.6.5. Magnesio.....  | 10 |
| 2.6.6. Azufre .....   | 11 |
| 2.6.7. Boro .....   | 11 |
| 2.6.8. Hierro .....   | 11 |
| 2.6.9. Zinc .....   | 11 |
| 2.7. Recomendaciones e importancia sobre la fertilización del cafeto..... | 11 |
| 2.7.1. Fertilización de café en desarrollo .....                          | 12 |
| 2.7.2. Fertilización de café en producción .....                          | 12 |
| 2.7.3. Épocas y métodos de aplicación .....                               | 14 |
| 2.8. Estudios de absorción de nutrientes .....                            | 14 |
| 2.9. Procedimiento básico para efectuar estudios de absorción .....       | 15 |
| 2.10. Importancia de los estudios de absorción de nutrientes .....        | 16 |
| Capítulo III. Metodología.....  | 17 |
| 3.1. Ubicación y descripción del área de estudio .....                    | 17 |

|   |    |
|---|----|
| 3.2. Periodo de estudio .....   | 17 |
| 3.3. Establecimiento y manejo de la investigación.....                                  | 17 |
| 3.4. Fertilización del cultivo .....  | 18 |
| 3.5. Método de aplicación de los fertilizantes .....                                    | 19 |
| 3.6. Procedimiento de recolección de muestras.....                                      | 19 |
| 3.7. Proyección del muestreo.....   | 21 |
| 3.8. Variables por evaluar.....   | 21 |
| 3.8.1. Peso fresco de frutos (g) (Pf) .....   | 21 |
| 3.8.2. Peso seco de frutos (g) (Ps).....  | 22 |
| 3.8.3. Concentración de nutrimentos en frutos (%) (Cn).....                             | 22 |
| 3.8.4. Acumulación de nutrimentos en frutos (An) .....                                  | 22 |
| 3.9. Análisis estadístico .....   | 22 |
| Capítulo IV. Resultados y discusión .....   | 24 |
| 4.1. Peso fresco de los frutos de café (g) .....  | 24 |
| 4.2. Crecimiento de los frutos.....   | 25 |
| 4.3. Peso seco de los frutos de café (g).....   | 26 |
| 4.4. Concentración de nutrimentos N, P, K, Ca y Mg en el fruto.....                     | 27 |
| 4.5. Extracción de los macronutrimentos de N, P, K, Ca y Mg en los frutos de café ..... | 30 |
| 4.6. Acumulación relativa de N, P, K, Ca y Mg en los frutos de café.....                | 34 |
| 4.7. Momentos de mayor demanda de los elementos N, P, K, Mg y Ca en los frutos .....    | 36 |
| 4.7.1. Nitrógeno .....  | 36 |

|  |    |
|--|----|
| 4.7.2. Fósforo .....   | 38 |
| 4.7.3. Potasio.....  | 39 |
| 4.7.4. Calcio .....  | 40 |
| 4.8. Curvas de variación estacional de N, P, K, Mg y Ca en las hojas.....                | 44 |
| 4.9. Concentración foliar de N, P, K, Ca y Mg .....                                      | 44 |
| 4.9.1. Nitrógeno .....   | 46 |
| 4.9.2. Fósforo .....   | 47 |
| 4.9.3. Potasio.....  | 48 |
| 4.9.4. Calcio .....  | 48 |
| 4.9.5. Magnesio.....   | 49 |
| Capítulo V. Conclusiones y recomendaciones .....   | 52 |
| 5.1. Conclusiones.....   | 52 |
| 5.2. Recomendaciones .....   | 52 |
| Referencias bibliográficas .....   | 54 |
| Anexos.....  | 62 |
| Anexo 1. Caracterización fenológica.....   | 62 |
| Anexo 2. Imágenes de estructuras vegetales reproductivas y registro de información ..... | 63 |

## Índice de figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 Distribución de la producción de café en fruta Dhl por región cafetalera, desde la cosecha 2011-2012 hasta 2017-2018. Año 2018 .....                               | 5  |
| Figura 2 Procedimiento para efectuar estudios de absorción en café.....   | 16 |
| Figura 3 Visualización geográfica del ensayo, Finca CoopeTarrazú, San Marcos de Tarrazú (Google Earth, 2020).....   | 17 |
| Figura 4 Diseño experimental y distribución de los tratamientos experimentales.....   | 18 |
| Figura 5 Ciclo de desarrollo del fruto de café.....   | 21 |
| Figura 6 Curva de los frutos de café cultivar IAC Obatá 1669-20 después del pico de floración hasta la cosecha, por cada 50 g de peso fresco y disminución porcentual ..... | 24 |
| Figura 7 Curva de crecimiento de los frutos y disminución porcentual de frutos de café cultivar IAC Obatá 1669-20 en términos de peso seco (50 g de frutos frescos).....    | 25 |
| Figura 8 Curva de crecimiento de frutos de café cultivar IAC Obatá 1669-20 en términos de peso seco (50 g de frutos frescos) e incremento porcentual .....                  | 26 |
| Figura 9 Acumulación de peso seco de frutos en café cultivar IAC Obatá 1669-20 en (50 g de frutos frescos) .....  | 27 |
| Figura 10 Variación estacional de la concentración de N-P-K-Ca-Mg en los frutos.....  | 29 |
| Figura 11 Cantidad extraída de nitrógeno (N) por los frutos de café en función del tiempo transcurrido, después del día pico de la floración .....                          | 37 |
| Figura 12 Cantidad extraída de fósforo (P) por los frutos de café en función del tiempo transcurrido, después del día pico de la floración.....                             | 38 |
| Figura 13 Cantidad extraída de potasio (K) por los frutos de café en función del tiempo transcurrido, después del día pico de la floración.....                             | 39 |
| Figura 14 Cantidad extraída de calcio (Ca) por los frutos de café en función del tiempo transcurrido, después del día pico de la floración.....                             | 41 |
| Figura 15 Cantidad extraída de magnesio (Mg) por los frutos de café en función del tiempo   |    |

|   |    |
|---|----|
| transcurrido, después del día pico de la floración .....  | 42 |
| Figura 16 Concentraciones (%) foliares de nitrógeno (N) en función de tiempo transcurrido, después del día pico de la floración ..... | 46 |
| Figura 17 Concentraciones (%) foliares de fósforo (P) en función de tiempo transcurrido, después del día pico de la floración .....   | 47 |
| Figura 18 Concentraciones (%) foliares de potasio (K) en función de tiempo transcurrido, después del día pico de la floración .....   | 48 |
| Figura 19 Concentraciones (%) foliares de calcio (Ca) en función de tiempo transcurrido, después del día pico de la floración .....   | 49 |
| Figura 20 Concentraciones (%) foliares de magnesio (Mg) en función de tiempo transcurrido, después del día pico de la floración.....  | 50 |
| Figura 21 Homogenización de la floración .....  | 63 |
| Figura 22 Selección de plantas y bandolas.....  | 63 |
| Figura 23 Peso de fruto maduros en un litro .....   | 64 |
| Figura 24 Peso de frutos mensuales .....  | 64 |
| Figura 25 Planta de café en su maduración final .....   | 64 |

## Índice de tablas

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1 Taxonomía del café .....   | 5  |
| Tabla 2 Programa de fertilización del Icafe .....  | 13 |
| Tabla 3 Plan de fertilización de Hacienda CoopeTarrazú R. L. por manzana (0.7 ha).....   | 19 |
| Tabla 4 Variación estacional de la concentración de nutrimentos en frutos de café en el cultivar IAC Obatá 1669-20 en San Marcos de Tarrazú, Costa Rica.....   | 28 |
| Tabla 5 Cantidades extraídas de macronutrimentos por el fruto del café, equivalentes a 10000 frutos .....  | 31 |
| Tabla 6 Extracción de nutrimentos en una fanega de café incluido en kilogramos por frutos maduros en el cultivar IAC Obatá 1669-20 .....   | 32 |
| Tabla 7 Extracción por número de fanegas expresada en kilogramos de nutrimentos N, P, K Ca y Mg por frutos maduros en el cultivar IAC Obatá 1669-20 .....  | 33 |
| Tabla 8 Extracción por número de fanegas expresada en kilogramos de nutrimentos N, P, K Ca y Mg en su forma tradicional de presentación comercial por frutos maduros en el cultivar IAC Obatá 1669-20..... | 34 |
| Tabla 9 Programa de fertilización de acompañamiento para el complemento nutricional del cultivar IAC Obatá 1669-20 .....   | 43 |
| Tabla 10 Variación estación de nutrimentos a nivel foliar (hojas) de café cultivar IAC Obatá 1669-20 en San Marcos de Tarrazú, Costa Rica .....  | 44 |
| Tabla 11 Estado fenológico de una planta en general .....  | 62 |
| Tabla 12 Resultado de análisis de suelo.....   | 63 |

## Resumen

El trabajo titulado “Determinación de la curva de extracción de nutrientes de los frutos de café (*Coffea arabica* L.) en el cultivar Obatá, en la zona de Los Santos” cuyo objetivo general fue determinar la curva de extracción y la composición mineral de los macronutrientes N, P, K, Ca y Mg de los frutos de café, para la orientación de las prácticas de fertilización en la zona de Los Santos y los objetivos específicos, estimar la cantidad de elementos requeridos por cada fanega (2 Dhl) producida. Establecer los momentos de mayor demanda de los elementos en los frutos de café del cultivar IAC Obatá 1669-20 en un ciclo productivo y determinar la relación de la extracción de nutrientes por parte de los frutos durante un ciclo de desarrollo y maduración, para el establecimiento de las curvas de variación estacional de los elementos N, P, K, Ca y Mg en las hojas. El trabajo se realizó de julio del 2020 a febrero del 2021. En la finca de CoopeTarrazú, ubicada específicamente en el distrito de San Marcos de Tarrazú en la Zona de Los Santos, San José Costa Rica. Las coordenadas geográficas corresponden a 9°39'22.22" latitud norte y 84° 1'39.29" de longitud oeste, se ubica a una altitud de 1390 (ms. n. m), con precipitación total anual promedio de 1700 mm y temperatura promedio anual entre 19°C y 20°C.

El orden de suelo es Ultisol y se clasifica taxonómicamente con el gran grupo Haplustults y de subgrupo Humults.

En relación con el lugar de estudio y para la obtención de datos, se utilizaron plantas con una edad de 3 años después de su trasplante ya que presentaran una óptima nutrición, el periodo de estudio comprendió desde el momento de floración principal del cultivo en el mes de mayo del 2020, donde se realizó una homogenización de la floración y se tomaron las muestras durante cada 30 días así como el conteo de los frutos de café con 50 gramos de peso fresco y acompañado con un muestreo foliar hasta su proceso de maduración y recolección total en el mes de febrero del 2021.

La determinación de las extracciones de cada uno de los nutrientes se relaciona directamente con el peso seco de los frutos y el promedio de la concentración de cada macronutriente mostró que el N y el K fueron los de mayor concentración en el fruto, seguidos por el Ca. Los contenidos de P y Mg fueron menores y similares. Asimismo, se desarrollaron curvas de absorción para cada uno de los nutrientes N, P, K, Ca y Mg y se determinó la cantidad consumida de extracción por fanega (2 Dhl) y los tiempos de consumo en relación con los días después del pico de la floración principal realizada

en el cultivo. En cuanto a los nutrimentos, se estableció un orden de acumulación en los frutos de la siguiente manera:  $K > N > Ca > Mg > P$  y el K fue el más demandante durante todo el ciclo productivo.

El conocimiento sobre la dinámica de los nutrimentos desde la flor hasta el fruto permite identificar los períodos de mayor exigencia pudiéndose mejorar la eficiencia de las prácticas de fertilización, con las concentraciones de los nutrientes en las hojas y su movilización hacia los frutos durante la fase reproductiva, ayuda en el diagnóstico del estado nutricional de las plantas, permitiendo ajustar los planes de la fertilización del cultivo del café y propiamente en el cultivar IAC Obatá 1669-20.

## Abstract

The work entitled "Determination of the nutrient extraction curve of coffee fruits (*Coffea arabica* L.) in the Obata cultivar, in the Los Santos area" whose general objective was to determine the extraction curve and the mineral composition of the macronutrients N, P, K, Ca and Mg of coffee fruits, for the orientation of fertilization practices in the Los Santos area and the specific objectives, to estimate the number of elements required for each fanega (2 Dhl) produced. Establish the moments of greatest demand for the elements in the coffee fruits of the IAC Obata 1669-20 cultivar in a productive cycle and determine the ratio of nutrient extraction by the fruits during a cycle of development and maturation, for the establishment of the seasonal variation curves of the elements N, P, K, Ca and Mg in the leaves. The work was carried out from July 2020 to February 2021. On the CoopeTarrazú farm, specifically located in the district of San Marcos de Tarrazú in the Los Santos Zone, San José Costa Rica. The geographical coordinates correspond to 9°39'22.22" north latitude and 84° 1'39.29" west longitude, it is located at an altitude of 1390 (ms.n.m), with average annual total rainfall of 1700 mm and average temperature annual between 19°C and 20°C.

The soil order is Ultisol and it is classified taxonomically with the large group Haplustults and the subgroup Humults.

In relation to the place of study and to obtain data, plants with an age of 3 years after their transplant were used since they presented optimal nutrition, the study period comprised from the moment of main flowering of the crop in the month May 2020, where a homogenization of the flowering was carried out and the samples were taken during every 30 days as well as the counting of the coffee fruits with 50 grams of fresh weight and accompanied by a foliar sampling until their maturation and harvesting process. total, in the month of February 2021.

The determination of the extractions of each of the nutrients is directly related to the dry weight of the fruits and the average concentration of each macronutrient showed that N and K were the ones with the highest concentration in the fruit, followed by Ca. The contents of P and Mg were lower and similar. Likewise, absorption curves were developed for each of the nutrients N, P, K, Ca and Mg and the amount of extraction consumed per fanega (2 Dhl) and the consumption times in relation to the days after the peak of consumption were determined. the main flowering carried out in the crop. Regarding the

nutrients, an accumulation order was established in the fruits as follows:  $K > N > Ca > Mg > P$  and K was the most demanding throughout the production cycle.

Knowledge about the dynamics of nutrients from the flower to the fruit allows identifying the periods of greatest demand, being able to improve the efficiency of fertilization practices, with the concentrations of nutrients in the leaves and their mobilization towards the fruits during the reproductive phase. , helps in the diagnosis of the nutritional status of the plants, allowing to adjust the fertilization plans of the coffee crop and properly in the cultivar IAC Obata 1669-20.

## Introducción

Según el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC, 2015), el cultivo de café (*Coffea arábica* L) representa el cultivo de mayor superficie sembrada; con un 23.8 % del total del área agrícola del país, lo que equivale a una extensión de 84.133 hectáreas. En el manejo agronómico del cultivo de café, las recomendaciones de fertilización en el desarrollo vegetativo y la cosecha se relacionan con la aplicación de grandes cantidades de fuentes fertilizantes que aportan nitrógeno y potasio (Bertsch, 2003; Ramírez et. al, 2002). De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, 2000):

Los fertilizantes son un insumo poderoso para fortalecer la productividad agrícola. Una tercera parte del incremento en la producción de cereales en todo el mundo, y un 50 % del incremento en la producción de granos en la India, han sido atribuidos a factores relacionados con los fertilizantes. Sin embargo, el uso de los fertilizantes no es un fin en sí mismo, sino que es un medio de incrementar la producción de alimentos. Un incremento de la producción y disponibilidad de alimentos puede a su vez, ser entendido como un objetivo del sector agrícola en el contexto de su contribución a objetivos macroeconómicos más amplios de la sociedad (p. 5).

En el cultivo de café los requerimientos nutricionales varían según la etapa o fase de crecimiento, por ende, conocer la demanda de nutrimentos desde el punto de vista de extracción de estos permite ajustar los programas de fertilización (Laviola *et. al*, 2008). La cantidad de un nutrimento por aplicar está asociada con los requerimientos nutricionales del cultivo de café, de acuerdo con la etapa de desarrollo vegetativo o desarrollo reproductivo, además de la capacidad del suelo para satisfacer las necesidades del cultivo (De León, 2008).

El sincronizar el aporte de nutrimentos con la demanda del cultivo es de primordial importancia para programar las actividades de fertilización con suficiente tiempo. Al definir las épocas de aplicación de fertilizantes se lleva a cabo el aporte de los nutrimentos en el momento oportuno y en la dosis adecuada para satisfacer los requerimientos de nutrición en los periodos de mayor demanda. De esta manera, mejora la eficiencia del uso de las fuentes

aplicadas como fertilizantes (Fernández, 2012), lo que optimiza la producción y causa un menor impacto ambiental (Herbert y Kramer, 2010).

Las estrategias de manejo de la nutrición del cultivo y, consecuentemente, el programa de fertilización, se pueden elaborar a través de las curvas de absorción de nutrimentos. Esta es una herramienta que permite conocer la dinámica de absorción de los diferentes nutrimentos durante el ciclo del cultivo y su relación con las distintas etapas fenológicas (Bertsch, 2009).

En el cultivo de café las principales etapas fenológicas comprenden la fase de floración, relacionada directamente con la cantidad y calidad de frutos por cosechar (Arcila, 2015). La fase de llenado de frutos ocurre después de la floración y se caracteriza por el proceso de formación y crecimiento del fruto, el desarrollo del endospermo, la semilla y, por último, el crecimiento máximo del grano verde, que se logra antes de la maduración (Cenicafe, 2018). La fase de maduración se asocia con el conjunto de cambios morfológicos y fisiológicos que se dan a partir de la fecundación, hasta el momento en que la semilla se encuentra en condiciones de cosecharse (Arcila, 2007).

Debido a la falta de información en cuanto a la acumulación de nutrimentos en los frutos de café en la zona de Los Santos y al costo económico, se propone este estudio que tiene como objetivo caracterizar las necesidades de nutrición mineral del café. Lo anterior mediante la cuantificación de la absorción de nutrimentos de los frutos de café en el cultivar Obatá, en la finca CoopeTarrazú R. L., ubicada en el cantón de Tarrazú, provincia de San José.

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

Determinar la curva de extracción de nutrimentos de los frutos de café (*Coffea arábica* L.), en el cultivar Obatá, para la orientación de las prácticas de fertilización en la zona de Los Santos.

### **Objetivos específicos**

Los objetivos específicos de la investigación son los siguientes:

1. Estimar la cantidad de elementos requeridos por cada fanega producida con la que se determine la extracción total de N, P, K, Ca y Mg por parte de los frutos, durante un ciclo de desarrollo y maduración.
2. Establecer los momentos de mayor demanda de los elementos N, P, K, Ca y Mg en los frutos durante el proceso de fructificación con los que se determinen los picos de extracción de los nutrimentos.
3. Determinar la relación de la extracción de nutrimentos por parte de los frutos durante un ciclo de desarrollo y maduración, para el establecimiento de las curvas de variación estacional de los elementos N, P, K, Ca y Mg en las hojas.

## Marco teórico

### Importancia del cultivo del café y aspectos generales

El cafeto es un arbusto originario de la región tropical y pertenece a la familia de las rubiáceas que comprende 500 géneros y 8.000 especies. Uno de esos géneros es el *Coffea*, que lo constituyen árboles, arbustos y bejucos e incluye unas 10 especies civilizadas, es decir, cultivadas por el hombre y 50 especies silvestres (Alvarado y Rojas, 2011).

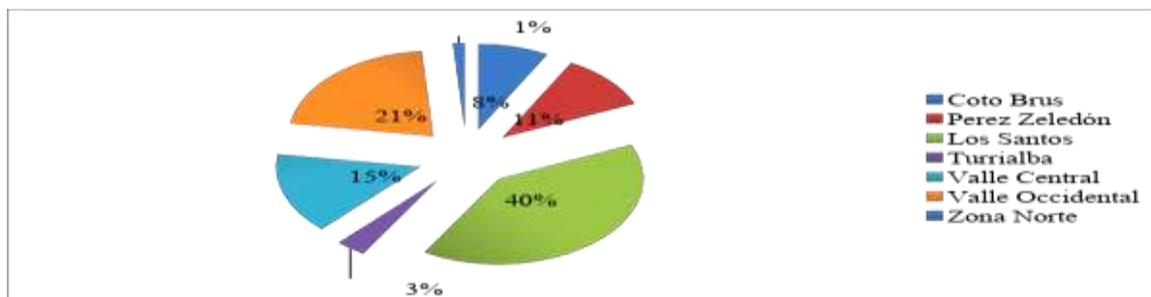
*C. arabica* se originó por la fusión de dos especies en África Oriental, *C. eugenoides* y *C. canephora*. Posteriormente, se originaron dos variedades de café del tipo Arábigo, 1) *Coffea arábica* var. *typica*, la cual fue la primera variedad cultivada en América y Asia y 2) *Coffea arábica* var. *bourbon* (World Coffee Research, 2016). Según Artavia Carmona (2018): “El origen de esta especie (*C. arábica*) es reciente y su mecanismo de reproducción por autofecundación le da a esta una baja diversidad genética, por lo que el mejoramiento genético de esta especie es difícil” (p. 5). Artavia Carmona (2018) también señala:

Este cultivo es importante para la economía y la política de muchos países en desarrollo, siendo el principal producto agrícola de consumo a nivel mundial. Las exportaciones de café representaron en la cosecha del 2018-19 un 2,5 % del total de ingresos y un 9,30 % del total de divisas generadas por el sector agropecuario. Además, el café aportó en el 2018 un 7,66 % del Producto Interno Bruto (PIB) Agrícola y un 0,27 % del PIB Nacional. Se estima que entre 2013 y 2015, solamente las exportaciones de café representaron un valor aproximado a los US\$ 22 billones (European Coffee Federation (ECF), 2016) (p. 6).

La región de Los Santos (ver Figura 1) es la zona donde se produce la mayor cantidad de café, comparada con las otras regiones cafetaleras del país (Instituto del café de Costa Rica [Icafe], 2018b).

### Figura 1

Distribución de la producción de café en fruta Dhl por región cafetalera, desde la cosecha 2011-2012 hasta 2017-2018. Año 2018



Fuente: Elaboración propia con datos del Icafe (2018b).

### Taxonomía y morfología del café

El café se clasifica taxonómica y morfológicamente de la siguiente manera:

**Tabla 1**

*Taxonomía del café*

|             |                      |
|-------------|----------------------|
| Reino       | <i>Plantae</i>       |
| División    | <i>Magnoliophyta</i> |
| Subdivisión | <i>Angiosperma</i>   |
| Clase       | <i>Magnoliatae</i>   |
| Subclase    | <i>Asteridae</i>     |
| Orden       | <i>Rubiales</i>      |
| Familia     | <i>Rubiaceae</i>     |
| Género      | <i>Coffea</i>        |
| Especie     | <i>Arabica.</i>      |

Fuente: Elaboración propia con datos de Alvarado y Rojas (2011).

## **Especies y cultivares**

De acuerdo con Mora (2008):

De las tres especies que se explotan comercialmente, *C arabica* es la más conspicua a nivel mundial, no sólo por el área sembrada y la cantidad suplida en el mercado, sino por la excelente calidad de su bebida. El café comercializado a nivel mundial proviene de *C. arábica* o arábicas, del *C. canephora* o robustas, y en menor escala, del *C. liberica* (p. 9).

Las variedades o cultivares de uso comercial en Costa Rica son de porte bajo, se adaptan a diferentes condiciones de clima y suelo, lo que facilita el manejo del cultivo y muestran una alta capacidad de producción. El área cultivada de estas variedades en Costa Rica alcanza el 91.15 % de la superficie total sembrada de café (Mora, 2008).

## **Condiciones climáticas**

### **Temperatura**

Según el Icafe (2020): La temperatura promedio anual favorable para el cafeto se ubica entre los 17 a 23 °C. Temperaturas inferiores a 10 °C., provocan clorosis y paralización del crecimiento de las hojas jóvenes y temperaturas mayores afectan la producción (p. 8).

### **Precipitación**

En relación con la precipitación factor determinante en la formación del fruto de café Yaselga (2013) afirma: Es un factor climático muy importante que tiene un efecto significativo en la floración y, por lo tanto, en la producción y en su época de maduración. En Costa Rica se ha determinado que, dependiendo de la época de maduración (temprana, media o tardía), se presentan diferencias importantes en el tamaño y calidad del grano, así como en la acidez, aroma y cuerpo del café en la taza (p. 63).

Por otra parte, Mora (2008) menciona: Una precipitación anual entre 1600 y 1800 es ideal para *C. arabica*, el mínimo absoluto para esta especie se ubica cerca de 1000 mm. Precipitaciones superiores a los 3000 mm deben considerarse como inapropiadas para el cultivo económico del café. Lo deseable es un período seco de tres a cuatro meses, que coincida con el reposo vegetativo y que preceda a la floración principal. En zonas donde no

ocurre una estación seca definida, las yemas florales crecen continuamente, dando como resultado floraciones sucesivas, con las consecuentes desventajas para la cosecha (pp. 10-11).

### **Humedad relativa**

De acuerdo con Mora (2008): “Se ha determinado que la humedad del aire no es un factor determinante en el cultivo del café. No obstante, se señala que un promedio de humedad relativa, de 70,0 a 95,0 %, es recomendable para *Coffea arabica*” (p. 11).

### **Luz solar**

Mora (2008) explica lo siguiente: La luz solar influye en los vegetales por el efecto de dos variables: Duración (fotoperiodo) e Intensidad (irradiación). En Costa Rica, experimentos efectuados en 1984 por técnicos del Convenio ICAFE, MAG, han demostrado que el cafeto produce más materia seca y fotosíntesis por unidad de área foliar, cuando el manejo del cultivo se hace en condiciones de solana. El cultivo al sol, en comparación con el manejo de este, utilizando sombra balanceada, produce un 10 % más; sin embargo, se presenta el inconveniente de que, bajo esta modalidad de cultivo, se intensifica el ataque de la enfermedad conocida como chasparria *Cercospora coffeicola* (Berkeley & Curtis) (p. 11).

### **Condiciones edáficas**

Con base a Mora (2008): El cafeto se cultivó a nivel mundial, en suelos de características físicas y químicas muy dispares. La producción de cosechas altas sólo puede tener lugar en suelos fértiles. En su defecto, la fertilidad debe ser mantenida artificialmente mediante la adición de abonos minerales, orgánicos o ambos, pues contribuyen al logro de un equilibrio nutricional óptimo (pp. 11-12).

### **Relieve**

Mora (2008) determina que basado en esta condición se influencia la productividad y se indica lo siguiente con respecto al relieve: Los suelos planos o ligeramente ondulados son los más aptos para el cultivo del café, por su mayor profundidad, capacidad de retención de agua y nutrimentos y, por ser aptos para la mecanización. No obstante, esta última ventaja

carece de importancia para la caficultura en Centroamérica, puesto que en general, las labores de cultivo se efectúan manualmente (p. 12).

### **Profundidad efectiva**

La profundidad efectiva del suelo es aquella que permite la penetración de la raíz de las plantas. “En el caso del cultivo de café, se ha determinado que son recomendables los suelos con profundidades no menores a un metro” (Mora, 2008, p. 12).

### **Manejo del cultivo relacionado con la fertilidad del café en el ámbito nacional**

La fertilidad del café está asociada al tipo de suelo, variedad, productividad, así como su fertilización mineral, según Mora (2008): En general, los suelos destinados a la producción de café requieren la utilización de fertilizantes, aplicados tanto directamente al suelo como por vía foliar para lograr niveles satisfactorios de producción. No obstante, el alto costo de los fertilizantes y la escasa rentabilidad del producto, como consecuencia de los bajos precios prevalecientes en el mercado internacional, hacen más imperiosa la necesidad de racionalizar su uso. Con este propósito, deben emplearse las fórmulas y las dosis adecuadas, de acuerdo con los resultados del análisis de suelos que previamente deben efectuarse, considerando el estado de desarrollo de la plantación y las épocas apropiadas (p. 12).

### **Elementos esenciales para la nutrición del café**

Concordando con Mora (2008): El cafeto requiere al menos 16 elementos nutritivos llamados elementos esenciales; tres de ellos, el carbono, el hidrógeno y el oxígeno, la planta los extrae del agua y del aire, los trece restantes son tomados del suelo mediante el sistema radical, los que pueden ser absorbidos también por vía foliar (p. 15).

Los elementos pueden clasificarse en macronutrientes primarios, macronutrientes secundarios y micronutrientes. El criterio que se utiliza es el grado de extracción que la planta hace de estos elementos esenciales. Lo anterior no significa que unos sean más importantes que otros (Molina y Meléndez, 2002).

## **Macronutrientes primarios**

Mora (2008) señala que estos: Pertenecen a este grupo, el nitrógeno, el fósforo y el potasio. Estos tres elementos los absorbe la planta en altas cantidades. Es por eso que las fórmulas de fertilizantes, especialmente para el café en producción, los incluyen como sus principales componentes (p. 15).

## **Macronutrientes secundarios**

Comprenden el calcio, el magnesio y el azufre. La planta los necesita en cantidades menores que las de los macronutrientes primarios (Icafe, 2012).

## **Micronutrientes**

De acuerdo con las condiciones fisiológicas de cada cultivo se presentan necesidades nutricionales para el caso de los micronutrientes basado con Mora (2008): Están formados por una serie de elementos que la planta necesita en pequeñísimas cantidades, pero no deben faltar, porque su carencia se manifiesta en trastornos nutricionales que impiden el adecuado desarrollo y consecuentemente, la producción del cultivo. Los elementos de esta serie son el boro, el zinc, el cobre, el hierro, el manganeso, el cloro y el molibdeno. Es conveniente un balance en el suelo entre los diferentes nutrientes, porque tan perjudicial puede ser para el cultivo la carencia de uno, como también el exceso de alguno de ellos (es común encontrar problemas de deficiencia de un determinado elemento, no por su inexistencia en el suelo, sino por exceso de otro que ocasione problemas de antagonismo) (pp. 15-16).

## **Función de los nutrientes**

### **Nitrógeno**

La funcionalidad del nitrógeno, así como la de cada elemento y su importancia son de forma vital para la comprensión del comportamiento de las plantas de acuerdo con Mora (2008): El nitrógeno interviene en la utilización de los carbohidratos y participa en la formación de compuestos orgánicos como los aminoácidos y las proteínas. Por lo tanto, forma parte del protoplasma celular y, consecuentemente, participa en la formación de la clorofila. La deficiencia de nitrógeno causa amarillamiento en la planta, precisamente por

falta de clorofila. El nitrógeno es muy importante en la producción del cafeto. No obstante, por su bajo contenido en el suelo y los altos requerimientos de la planta, debe suministrarse en cantidades considerables y oportunamente (p. 16).

### **Fósforo**

Mora (2008) indica que: Este elemento interviene en gran número de procesos metabólicos que estimulan la división celular; contribuye en el buen desarrollo radical y en el crecimiento de nuevos brotes. Favorece también la floración y su fertilidad (por medio de polen), y es esencial para la buena formación del fruto y de la semilla (p. 16).

### **Potasio**

El rol del potasio, uno de los elementos más importantes en la producción de las plantas y su comportamiento concuerda con lo indicado por Mora (2008) y señala lo siguiente: El potasio desempeña varias funciones vitales en la planta. Entre otras, participa en la formación y en el transporte de almidones que constituyen las sustancias de reserva. Además, proporciona consistencia a los tejidos y aumento de la resistencia de la planta a las enfermedades (p. 17).

### **Calcio**

Conforme a lo indicado en Mora (2008): “El calcio actúa como regulador del crecimiento. En ausencia de este elemento, las raíces y los brotes nuevos no aumentan en longitud” (p. 17). Además, forma parte de la pared celular, importante en el aprovechamiento de otros nutrimentos.

### **Magnesio**

Mora (2008) afirma: “Este elemento es el principal componente de la molécula de clorofila, por lo tanto, es de mucha importancia en el proceso fotosintético. Actúa en varios procesos enzimáticos y contribuye en el aprovechamiento del fósforo dentro de la planta” (p. 17).

## **Azufre**

Según Mora (2008): “Es necesario para que se efectúe la síntesis de los aminoácidos y la transformación de la energía en la planta” (p. 17).

## **Boro**

En cuanto a este elemento, Mora (2008) afirma:

Actúa como regulador del crecimiento e interviene en la absorción de nitratos. La fertilidad del polen está relacionada con la disponibilidad de boro; este elemento también está asociado con el metabolismo de los carbohidratos, facilita el movimiento de los azúcares e interviene en el proceso de división celular. Con una adecuada presencia de este elemento en la planta, se logra buen [sic] fructificación, porque influye en la floración y en la formación del grano (p. 17).

## **Hierro**

De acuerdo con Mora (2008): “Al igual que el magnesio, este elemento interviene en la formación de la clorofila y en el metabolismo de la planta” (p. 17).

## **Zinc**

Mora (2008) plantea:

Así como otros elementos menores, interviene en funciones de tipo orgánico y participa en la formación de la clorofila, actuando como catalizador y como elemento regulador de crecimiento. Se cree que podría ser causa de reducción de este en la longitud de los internodos y de las alteraciones, tanto en el tamaño como en la forma de las hojas, cuando existe deficiencia del zinc (pp. 17-18).

## **Recomendaciones e importancia sobre la fertilización del café**

Según Mora (2008): “Los fertilizantes son básicamente sales solubles de uno o más elementos nutritivos esenciales para la planta. Se aplican para completar la existencia natural de esos nutrientes en el suelo, necesarios en el normal crecimiento y en la producción” (p. 18). Además, se clasifican de acuerdo con su contenido de elementos, en fertilizantes simples y compuestos (FAO, 2010).

Los fertilizantes simples son aquellos que contienen solamente uno o dos elementos esenciales y pueden ser utilizados, bien como fertilizantes, bien como materias primas en la fabricación de las llamadas fórmulas completas. Un ejemplo de estos es el nitrato de amonio, que se emplea frecuentemente en el cultivo del café para suplir el nitrógeno (Mora, 2008, p. 18).

Los fertilizantes compuestos son aquellos que contienen dos o tres macronutrientes primarios y, en ciertos casos, algunos macronutrientes secundarios y micronutrientes. Mora (2008) agrega:

Su composición se detecta mediante el uso de números separados entre sí por guiones, que expresan el porcentaje de cada uno de ellos en la fórmula. Por ejemplo, una fórmula como la 20-7-12-3-1,2 indica que en cada 46 Kg (1 quintal) de fertilizantes hay: 20 unidades de nitrógeno (N); 7 unidades de fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>); 12 unidades de potasio (K<sub>2</sub>O); 3 unidades de magnesio (MgO); 1,2 unidades de boro (B) (p. 18).

#### **Fertilización de café en desarrollo**

De acuerdo con Mora (2008): Es recomendable, en el establecimiento de cafetales, la aplicación de fertilizantes con alto contenido de fósforo y potasio, porque pueden suministrarse utilizando fórmulas como 10-30-10 o 12-24-12 en cantidades que oscilan entre 200 y 400 kg/ha en el momento de la siembra, siempre y cuando se tenga certeza de que existe deficiencia de estos elementos. En su etapa de desarrollo, el café necesita especialmente el suministro de cantidades considerables de nitrógeno. Una recomendación general para suplir estas necesidades consiste en aplicar 450 kg/ha-1 de nitrato de amonio (nutran) al año, distribuidos en tres aplicaciones. Además, es importante complementar la fertilización con micronutrientes como el boro y el zinc, los que preferiblemente deben aplicarse por vía foliar (pp. 18-19).

#### **Fertilización de café en producción**

Al respecto, Mora (2008) señala: Para lograr productividades estables durante la vida activa de una plantación de café, es indispensable la aplicación de fertilizantes que suplan los elementos minerales que necesita el cultivo. Con este propósito, se recomienda el uso de fórmulas integradas que incluyan N, P, K, Mg y B. Entre las más usadas se mencionan las

siguientes: 18-5-15-2, 20-7-12-3-1.2, 20-3-10-3-1.2, 18-3-15-4-2 y otras similares, utilizando de 500 a 1000 kg/ha al año, en dos aplicaciones. También es importante hacer una fertilización adicional a base de nitrógeno, con nitrato de amonio, aplicando 259 kg/ha-1.

El uso de fertilizantes está asociado a una serie de aspectos, entre los que destacan, la modalidad del cultivo (al sol o bajo sombra regulada), el sistema de poda, la densidad de siembra, el control de plagas, enfermedades y malezas, etc. La eficiencia en la realización de estas prácticas de cultivo incide directamente en la productividad. Por tanto, a manera de orientación general, se detallan [sic] las fórmulas y cantidades que deben utilizarse, de acuerdo con el nivel de producción (p. 19).

**Tabla 2**

*Programa de fertilización del ICAFE*

| Producción estimada | Mayo<br>Fórmula completa<br>(Kg. ha <sup>-1</sup> ) | Julio-agosto<br>Fórmula completa<br>(Kg. ha <sup>-1</sup> ) | Octubre-noviembre<br>Nitrato de amonio (NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> )<br>(Kg. ha <sup>-1</sup> ) |
|---------------------|---|---|--|
| 20                  | 250   | 250   | 179  |
| 40                  | 375   | 375   | 224  |
| 60                  | 500   | 500   | 269  |

Fuente: ICAFE (2011).

Mora (2008) agrega:

Como complemento a la fertilización, es importante aplicar al voleo una enmienda, entendiéndose por ello, aquel producto que se adiciona al suelo con el propósito de modificar su reacción (acidez) pero que, a su vez, actúa en las condiciones químicas y biológicas. En términos generales, se aplican de 1,5 a 2 ton/ha de carbonato de calcio cada tres o cuatro [sic] años (p. 20).

## **Épocas y métodos de aplicación**

Según Mora (2008):

Las épocas de aplicación de fertilizantes están determinadas de acuerdo con las características climáticas que prevalen en cada zona. De esta manera, la primera aplicación de fertilizante (fórmula completa) debe efectuarse entre mayo y junio; y la segunda, dos meses después (agosto y setiembre). En cuanto a la aplicación extra de nitrógeno, en las áreas con influencia atlántica, debe hacerse entre enero y febrero, mientras que, en las zonas con influencia pacífica, es conveniente hacerla antes de que se terminen las lluvias de octubre y noviembre. En las zonas productoras ubicadas en el Pacífico Húmedo (Coto Brus y zonas adyacentes), la primera aplicación de fórmula completa debe hacerse entre abril y mayo; la segunda entre julio y agosto; y la extra de nitrógeno, entre octubre y noviembre (p. 20).

## **Estudios de absorción de nutrimentos**

El término estudios de absorción se relaciona con todos aquellos estudios que tratan de cuantificar los requisitos, la extracción o el consumo de nutrimentos que efectúa un cultivo para completar su ciclo de producción (Cardoso & Moreno, 2014).

Castro Sánchez (2017) plantea al respecto: La curva de crecimiento permite obtener medidas del incremento en el peso seco de la planta, mientras que la curva de acumulación de nutrientes determina la cantidad de estos extraída por la planta en su ciclo de vida. La determinación de estas dos curvas permite establecer las etapas de mayor producción de biomasa y requerimientos nutricionales, por lo que se puede planificar mejor la fertilización del cultivo (p. 15).

Una curva de absorción es la representación gráfica de la extracción de un nutrimento y representa las cantidades de este elemento extraídas por la planta durante una parte o todo su ciclo de vida (Khalajabadi, 2017). Las curvas de absorción permiten conocer, de forma aproximada, las necesidades diarias de los diferentes nutrimentos por parte del cultivo.

En la determinación de las curvas de absorción se cuantifica experimentalmente la absorción del nutrimento en diferentes periodos de crecimiento de la planta, considerando etapas como desarrollo vegetativo, floración y fructificación, en las cuales se producen

importantes cambios en el consumo de nutrimentos (Bertsch, 2009). El procedimiento que se utiliza para elaborar una curva de absorción de nutrimentos de manera experimental es el siguiente:

- Seleccionar la variedad por estudiar.
- Seleccionar plantas en condiciones ideales de desarrollo de suelo y manejo.
- Recolectar los tejidos de interés de las plantas muestreadas.
- Medir el peso fresco de las muestras, peso seco y contenido de nutrimentos.
- Determinar la cantidad de biomasa acumulada y las cantidades de nutrimentos extraídas por el cultivo en kg/ha-1.
- Graficar la curva de crecimiento (materia seca acumulada en cada estado de muestreo) y la curva de absorción (cantidades extraídas de cada elemento en cada estado de muestreo) (Sancho, 1999).

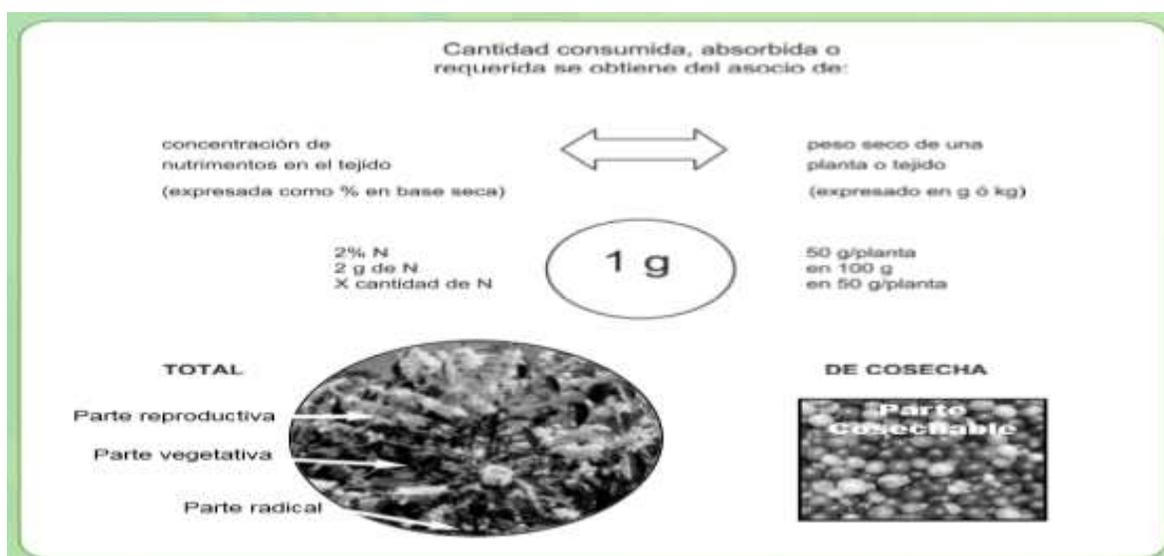
### **Procedimiento básico para efectuar estudios de absorción**

Según Bertsch (2009):

La cantidad consumida, absorbida o requerida por una planta se obtiene del asocio del [sic] peso seco de los tejidos, con las concentraciones de nutrimentos presentes en esos tejidos. Como ya se mencionó, estos estudios pueden ser hechos una única vez en el ciclo, preferiblemente al final del mismo, cuando la absorción ha llegado a su nivel máximo, como son los que se refieren a requisitos totales y/o de cosecha, o contemplar varias etapas, preferiblemente asociadas a cambios fenológicos importantes, durante el ciclo de vida del cultivo, con lo que se pueden elaborar las curvas de absorción. También pueden hacerse contemplando la planta entera como un todo, o subdividido por tejidos. En cualquiera de los casos, lo que siempre es indispensable, es contar con el rendimiento comercial obtenido para ese cultivo, que pueda ser asociado a ese consumo en concreto (s. p.).

## Figura 2

Procedimiento para efectuar estudios de absorción en café



Fuente: Bertsch (2005).

## Importancia de los estudios de absorción de nutrimentos

La utilidad de las curvas de absorción se basa en conocer el comportamiento de estas, lo que permite determinar los periodos de mayor absorción de nutrimentos durante el ciclo de crecimiento del cultivo. Con esta información se pueden definir las épocas para aplicar los fertilizantes en los programas de fertilización, lo que permite su máximo aprovechamiento, Sancho (1999). En los estudios de la nutrición vegetal, la extracción de nutrientes por la planta durante las diferentes etapas del desarrollo del cultivo, junto con los resultados sobre la respuesta a la fertilización permite ajustar los planes de manejo y reducir los riesgos económicos y ambientales. La cantidad de nutrientes requeridos por las plantas depende de la interacción de factores como 1) las exigencias de la planta (especie y variedad), 2) el nivel de producción, 3) las propiedades de suelo, 4) los componentes ambientales y 5) el manejo. En concordancia a lo expuesto, la extracción continuada de nutrientes por la cosecha acompañada de poco o nulo reemplazo a través del abonamiento, reduce la producción e incrementa la probabilidad de respuesta a la fertilización, de acuerdo con Sadeghian *et. al*, (2003) (p. 26).

## Metodología

### Ubicación y descripción del área de estudio

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo en la finca de CoopeTarrazú, ubicada en el Valle Central de Costa Rica, específicamente en el distrito de San Marcos de Tarrazú, San José. Las coordenadas geográficas del área experimental en la finca CoopeTarrazú R. L. corresponden a 9°39'22.22" latitud norte y 84° 1'39.29" de longitud oeste, se ubica a una altitud de 1390 (ms. n. m), con precipitación total anual de 1700 mm y temperatura promedio anual entre 19°C y 20°C, la humedad relativa promedio es de 89 %. La topografía del área de estudio posee menos de 5 % de pendiente, con gradiente en un solo sentido norte-sur, el orden de suelo del sitio de estudio es Ultisol y se clasifica taxonómicamente con el gran grupo Haplustults y de subgrupo Humults.

### *Figura 3*

Visualización geográfica del ensayo, Finca CoopeTarrazú, San Marcos de Tarrazú (Google Earth, 2020)



### Periodo de estudio

El estudio se llevó a cabo posterior al pico de floración, hasta el momento de maduración y su recolección total, de junio de 2020 a febrero de 2021 (cosecha 2020-2021).

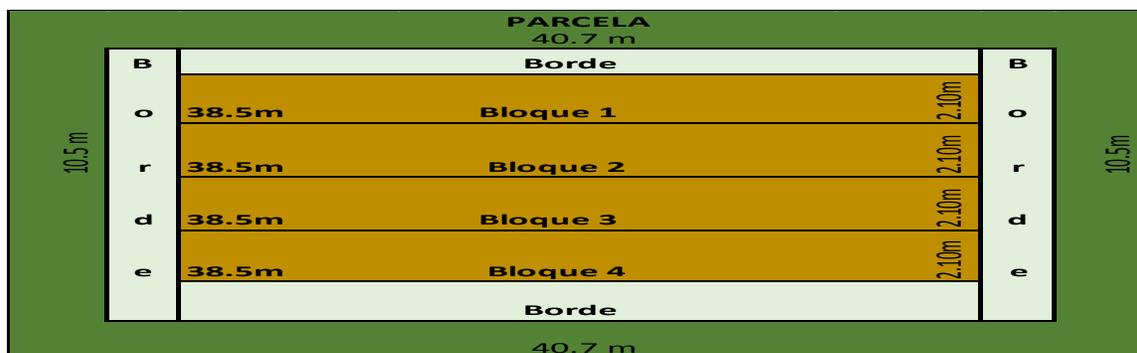
### Establecimiento y manejo de la investigación

La extensión total del área experimental fue de 427.35 m<sup>2</sup>, que corresponden a 10.5 m de ancho por 40.7 m de largo. Se establecieron 4 bloques conformados por 4 parcelas, con las dimensiones de 2,10 m de ancho y 38,5 m de largo en cada parcela, lo que representa

80,85 m<sup>2</sup> de área por parcela y 323,4 m<sup>2</sup> de área efectiva. La siembra se llevó a cabo con una distancia de 2,10 m entre hileras y 1,10 m entre plantas, para una densidad de siembra de 4329 plantas/ha-1. En las parcelas experimentales se establecieron 4 surcos con 35 plantas cada uno y la parcela útil estuvo conformada por 140 plantas.

**Figura 4**

Diseño experimental y distribución de los tratamientos experimentales



Dentro de cada surco se seleccionó aleatoriamente una bandola productiva del tercio medio de la planta, la cual se marcó con una cinta en la base de la bandola y al final de cada mes se cosecharon los frutos de la bandola. Se muestrearon al azar de 100 a 140 bandolas por mes, de junio de 2020 a febrero de 2021. Las plantas que se utilizaron como bordes del lote no se incluyeron, de acuerdo con su exposición a cambios de variables, como mayor exposición a influencia de derivas de aplicación de otros productos, por lo que se tomaron las previsiones del caso para no considerarlas.

**Fertilización del cultivo**

Para efectos del trabajo de investigación se registró el manejo que CoopeTarrazú R. L. le realiza a la plantación que se basa en el plan de fertilización establecido por CoopeTarrazú R. L (ver Tabla 3) y de acuerdo con el análisis de suelo de la parcela (Tabla 10 en Apéndice).

**Tabla 3**

Plan de fertilización de Hacienda CoopeTarrazú R. L. por hectárea (1 ha)

| <b>Fecha de aplicación</b> | <b>Tipo de fertilizante</b>             | <b>(Kg. ha<sup>-1</sup>) *</b> |
|----------------------------|---|--------------------------------|
| 19/07/2020                 | (12-11-18 +2,7) + Microelementos        | 513,9                          |
| 15/08/2020                 | 18-5-15-6                               | 513,9                          |
| 11/09/2020                 | (17-6-18-5-1,6 (S) -0,2 (B) -0,1. (Zn). | 513,9                          |
| 23/10/2020                 | 23-0-6-9 CaO-5,6 MgO-0,4(B)             | 513,9                          |

Fuente: Administrador de finca (2020).

### **Método de aplicación de los fertilizantes**

Las aplicaciones del fertilizante se realizaron de forma localizada, alrededor de la planta, en sentido contrario a la pendiente, para evitar pérdidas por lavado del fertilizante. Su aplicación se llevó a cabo con base en los meses establecidos en el plan de fertilización del ICAFE y junto con el manejo de CoopeTarrazú R. L. La aplicación se efectuó en horas tempranas del día, para evitar pérdidas de nitrógeno del fertilizante por volatilización.

### **Procedimiento de recolección de muestras**

Las plantas que se seleccionaron y que se utilizaron en la fase experimental de campo se caracterizaron por presentar una buena condición nutricional y fitosanitaria en el momento de la evaluación. La edad de la plantación correspondió al cuarto año después de su trasplante. Se realizaron las labores de campo con mediciones mensuales, extrayendo de las plantas los granos formados después de la apertura floral, de acuerdo con las metodologías de Bertsch (2009), Ramírez, Bertsch y Mora (2002) y Sancho (1999).

Además, se seleccionaron 140 plantas, cada una representa una unidad experimental. Se tomaron muestras de frutos en las bandolas del tercio medio de plantas que se seleccionaron aleatoriamente al iniciar la investigación y se marcó con cinta la base de la

bandola seleccionada por planta, en total se marcaron 140 bandolas por muestreo. Este procedimiento se repitió durante los 8 meses siguientes, hasta completar 8 muestreos.

Con el fin de uniformar la edad de los frutos en estudio de 10 a 15 días después de la floración principal, una vez apagada la flor, se desprendieron los botones florales que no abrieron, así como los frutos de floraciones anteriores. Cada 30 días después de la floración se escogieron en cada bloque frutos al azar hasta completar aproximadamente 50 g. En cada una de estas muestras se llevó a cabo un conteo del número de frutos, lo que permitió determinar la extracción mensual de nutrimentos por fruto (Rojas Rojas y Avellán Gámez, 2015).

Las muestras se llevaron al laboratorio del ICAFE, ubicado en San Pedro de Barva de Heredia, en el Centro de Investigaciones de Café de Costa Rica (Cicafe), en donde se les determinó el peso seco y los contenidos de N, P, K, Mg y Ca. Este procedimiento se repitió cada 30 días, hasta los 8 meses y después cada 15 días, hasta la madurez de los frutos. Una vez que los frutos alcanzaron la madurez, se contó el número de frutos maduros contenidos en un litro, dato que, junto con el peso seco por fruto, permitió establecer la extracción de nutrimentos a dos dobles hectolitros (2 Dhl). Unidad de volumen conocida como "fanega" Icafe (2018b).

Cada muestreo de frutos se acompañó de un muestreo foliar, el cual permitió comparar el comportamiento de extracción. El muestreo foliar se llevó a cabo según la metodología de Diaz-Romeu y Hunter (1978), por lo que se recolectaron 20 hojas por bloque, tomadas del tercer o cuarto o pares de hojas del tercio medio de bandolas productivas, de plantas que se seleccionaron al azar (plantas no marcadas).

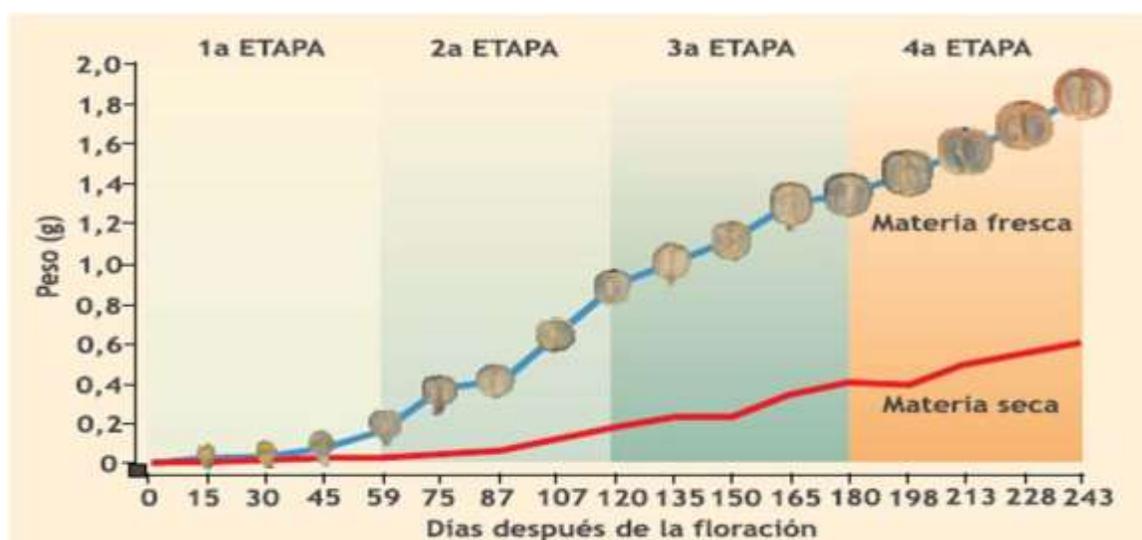
Para el caso del análisis foliar, las concentraciones de Ca, Mg, P y K se determinaron por medio de una digestión por microondas, utilizando ácido nítrico y peróxido de hidrógeno (equipo modelo MARSpress, marca CEM) de lectura multielemental por plasma (equipo marca Agilent, modelo, 5110). Para el caso del N, se analizó mediante el método Kjeldahl, donde la muestra se sometió a una digestión en ácido sulfúrico (equipo modelo Kjehl Digester K-449, marca Buchi), después una destilación de la muestra ácida en una solución concentrada de hidróxido sódico y se tituló manualmente con ácido sulfúrico (R. Gonzales, comunicación personal, 4 de mayo de 2020).

## Proyección del muestreo

En relación con el muestreo mensual de bandolas y la selección de plantas, conforme avanzó el tiempo de muestreo e incrementó el tamaño del fruto, la cantidad de frutos recolectados disminuyó (ver Figura 5), debido a que el número de frutos por bandola disminuyó al incrementar el tamaño, de esta forma, las muestras se relacionaron por peso y cantidad de plantas. Por lo anterior, se estableció una correlación entre mes, peso y cantidad de frutos, ya que en cada muestreo se recolectaron 50 g de peso fresco.

### Figura 5

Ciclo de desarrollo del fruto de café



Fuente: Elaboración propia con datos del Icafe (2018a).

### Variables por evaluar

Se recolectaron los datos en el área experimental asignada, evaluando las siguientes variables:

#### Peso fresco de frutos (g) (Pf)

Para obtener el peso fresco mensualmente desde junio de 2020 hasta febrero de 2021, los frutos de cada bandola se cosecharon, se contaron y se pesaron en campo en una balanza digital con precisión de 0.1 g (Rojas Rojas y Avellán Gámez, 2015).

### **Peso seco de frutos (g) (Ps)**

Después de cada muestreo, para cuantificar el peso seco de los frutos cosechados y contados en campo, se trasladaron los 50 g de peso fresco al laboratorio del Icafe, para someterlos en estufa a temperaturas de 70°C durante 72 horas. Posteriormente se pesaron en una balanza digital con precisión de 0.1 g (Rojas Rojas y Avellán Gámez, 2015).

### **Concentración de nutrimentos en frutos (%) (Cn)**

Las muestras secas se procesaron en un molino del laboratorio del Icafe. Para determinar la concentración de N, se utiliza el método Kjeldahl anteriormente descrito para el análisis foliar. La determinación del porcentaje de los nutrimentos Ca, Mg, P y K en los frutos cosechados mensualmente se lleva a cabo mediante el método de la digestión húmeda propuesta por Shirin *et. al*, (2008), para muestras de tejido vegetal y frutas. Este análisis consiste en digestión por microondas, descomposición de la muestra por ácidos, que se realiza en vasos de teflón sobre bloques de aluminio o en placas, respectivamente calientes.

### **Acumulación de nutrimentos en frutos (An)**

La variable acumulación de nutrimentos resulta de multiplicar la concentración del nutrimento en porcentaje por el peso seco del fruto durante la floración y maduración (Rojas Rojas y Avellán Gámez, 2015).

### **Análisis estadístico**

Los ajustes de las curvas de concentración de los nutrimentos y de peso seco se analizaron a través de correlaciones y regresiones, utilizando la relación de los días después del pico de floración, para esto, se usó el programa R Studio (versión 9). En las variables concentración de nutrimentos y peso seco se llevó a cabo la curva correspondiente de cada nutrimento.

Las variables peso seco de los frutos (Ps), concentración de nutrimentos en frutos (Cn) y acumulación de nutrimentos (An), se analizaron mediante un análisis de regresión lineal. Lo anterior con la variable fecha de muestreo como variable independiente

estableciéndose una propuesta de modelo matemático para su implementación como se indica enseguida:

$$Y_i = \alpha + \beta X_i + \varepsilon_i$$

*Donde*

$Y_i$  = observación de la variable dependiente bajo el i-ésimo valor observado de X,  $i=1, \dots, n$ .

$X_i$  = i-ésimo valor de la variable independiente,  $i=1, \dots, n$ .

$\alpha$  = parámetro que representa la ordenada al origen de la recta.

$\beta$  = parámetro que representa la pendiente de la recta.

$\varepsilon_i$  = variación aleatoria asociada con la j-ésima observación de Y bajo el nivel  $X_i$

Los  $\varepsilon_i$  se suponen normales e independientes, distribuidos con esperanza 0 y varianza  $\sigma^2$  para todo X, en un intervalo donde el modelo se supone verdadero.

De esta forma, se procuró obtener una curva de variación estacional para explicar el crecimiento de los frutos, expresado en términos de peso, en función del tiempo y la concentración de nutrientes en el fruto de café, en función del tiempo transcurrido. Por otra parte, se determinó una curva de variación estacional para las hojas, para analizar las variaciones de las concentraciones de nutrientes en las hojas a través del tiempo, con la finalidad de comparar la acumulación de nutrientes entre hojas y frutos.

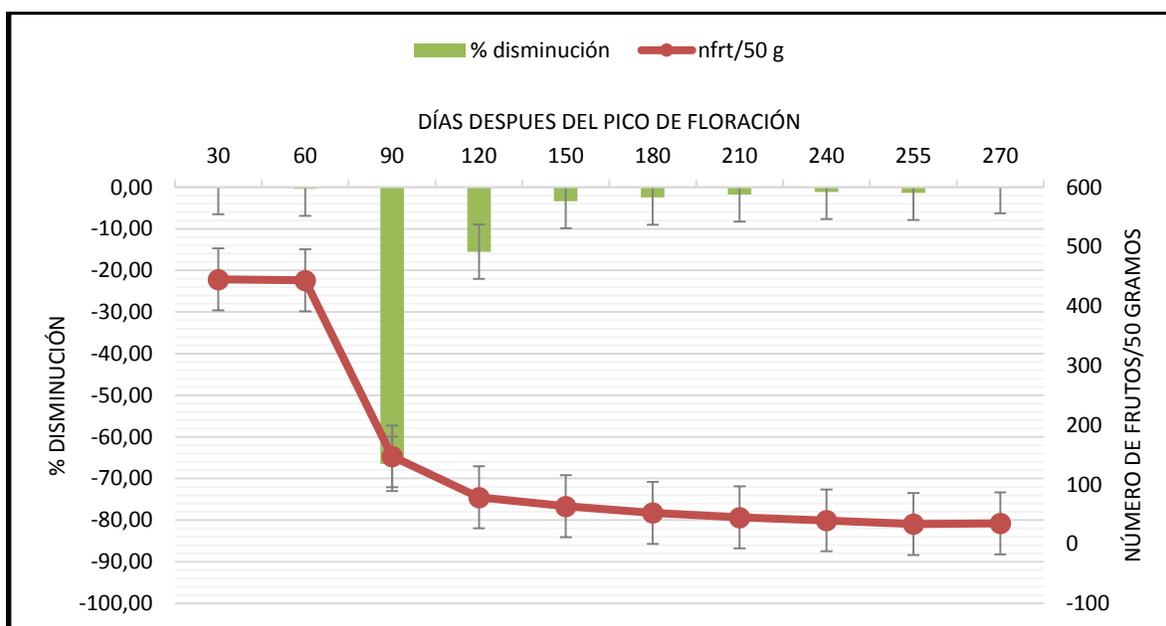
## Resultados y discusión

### Peso fresco de los frutos de café (g)

La Figura 6 muestra el comportamiento en la disminución en el número de frutos en relación con la constante de 50 gramos de peso fresco durante cada 30 días después de la floración (ddf), con una etapa de lento desarrollo en los primeros 60 (ddf) con 420 frutos en promedio. A los 180 ddf con un promedio de 54 frutos se presenta un incremento en la biomasa del fruto, sin embargo, el máximo incremento se alcanzó entre los 240 ddf con un promedio de 50 frutos y 270 ddf con un promedio de 48 frutos.

### Figura 6

Curva del número de frutos de café del cultivar IAC Obatá 1669-20 después del pico de floración hasta la cosecha, por cada 50 g de peso fresco y disminución porcentual



De acuerdo con Salazar *et. al.*, (1994) la curva de peso fresco de los frutos de café usualmente tiene un crecimiento sigmoide, ya que presenta un cambio de forma acelerada en el número de frutos (nfrt) y el peso fresco (Pf), en relación con su variación estacional cada 30 días después del pico de floración (ddf). Lo anterior, junto con los resultados en la Figura 6, presenta la relación entre días después del pico de floración, la variable de los 50 gramos de peso fresco y la disminución en porcentaje en la cantidad de frutos.

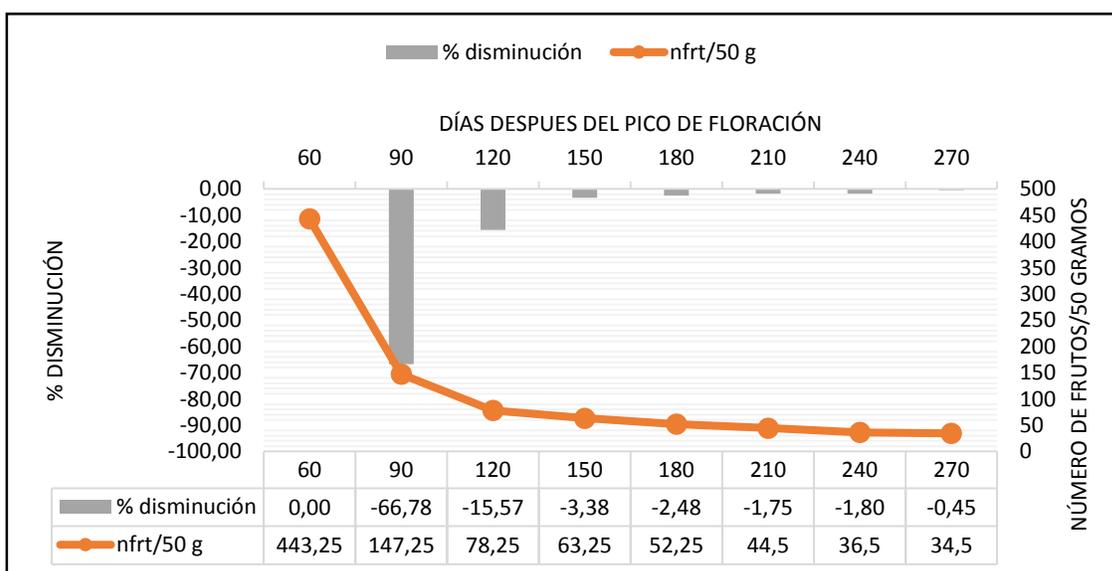
De acuerdo con Laviola *et. al.*, (2007a) en la Figura 6 la disminución en el número de frutos es el normal y esperado debido a que los frutos, con base en los días después del pico de floración, se encuentran en un proceso de crecimiento. Por lo tanto, entre los 30 y 60 primeros ddf cuenta con alrededor de los 450 frutos para los 50 g de peso fresco de las muestras, con un porcentaje de disminución de apenas un 10 %. Para el muestreo que se tomó a los 240 ddf se terminó con alrededor de 50 frutos maduros y una disminución porcentual de los frutos de café de un 90 %.

### Crecimiento de los frutos

Para el caso de la Figura 7 se observa un comportamiento en el crecimiento de los frutos de café, ya que se presenta una disminución en el número de frutos durante cada 30 días, el cual es semejante al encontrado por Valencia (1998), quien menciona que el tamaño de los frutos comprende 3 etapas, una de crecimiento lento, que va desde la floración hasta los 60 días, otra de rápido crecimiento hasta los 180 días y, finalmente, una de estabilización, hasta llegar a la madurez completa a los 240 días. Cannel (1971) y Rena *et. al.*, (2001) (citados por Laviola *et. al.*, 2008) también reportaron resultados similares. Propiamente para este estudio la diferencia es que el ciclo de maduración total se da hasta los 270 ddf.

### Figura 7

Curva de crecimiento de los frutos y disminución porcentual de frutos de café cultivar IAC Obatá 1669-20 en términos de peso seco (50 g de frutos frescos)



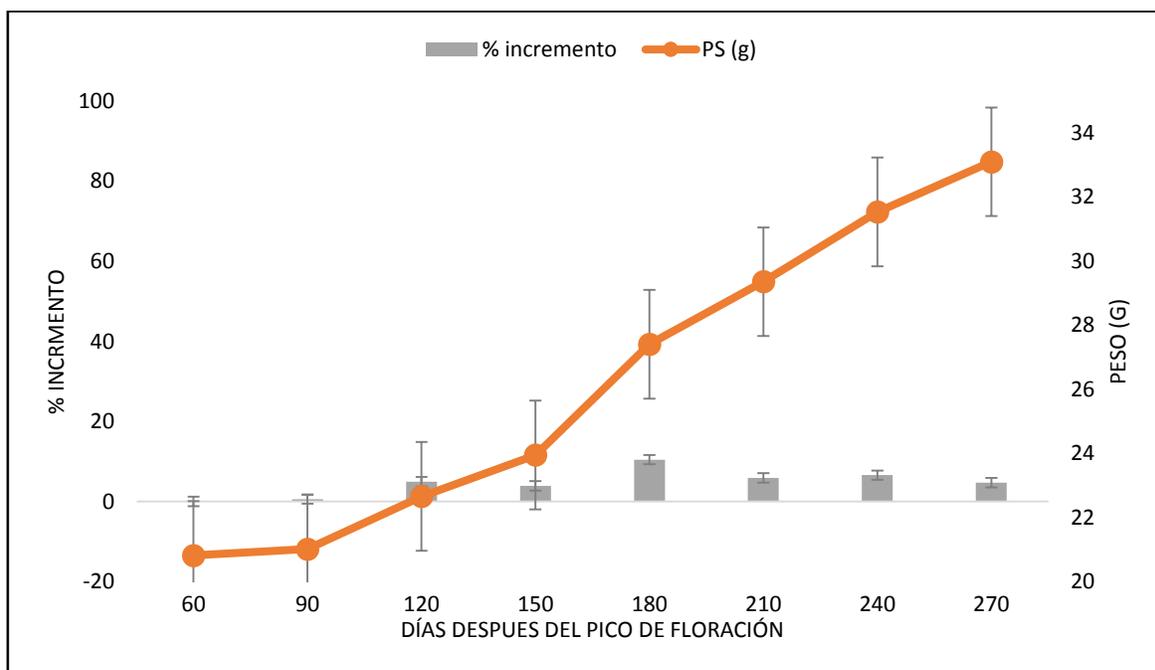
Para el caso específico de la curva del crecimiento de los frutos, y la constante muestra tomada de los 50 g de peso fresco concuerda con lo encontrado por Riaño *et. al*, (2004), quienes establecen que conforme avanzan los días es de esperarse que los frutos de café incrementen de tamaño de forma significativa, semejante a lo reportado por Chaves y Sarruge (1984). Un caso similar se presentó en el comportamiento del final del ciclo del fruto con Salazar *et. al*, (1994), sin embargo, ese estudio fue entre 180 y 210 ddf y se realizó sobre el crecimiento del fruto de café en la variedad Colombia.

### Peso seco de los frutos de café (g)

En la Figura 8 se observa la curva de peso seco de los frutos de café y su variación en el tiempo durante cada mes. Se establece que para los 180 ddf se obtuvo el mayor aumento de peso de los frutos y que para el momento de maduración final de los frutos (270 ddf) se termina con pesos de 33 g en promedio.

### Figura 8

Curva de crecimiento de frutos de café cultivar IAC Obatá 1669-20 en términos de peso seco (50 g de frutos frescos) e incremento porcentual



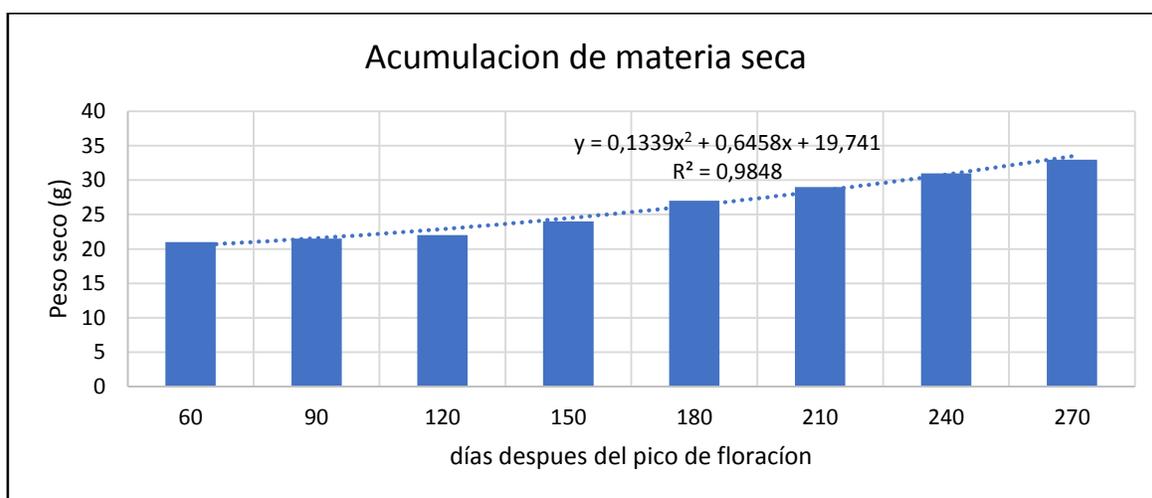
A los 210 días después de la floración se presenta otro incremento en el crecimiento del fruto, lo que se asocia con el incremento en la materia seca. Lo anterior coincide con el

estudio realizado por Segura (1992), con un cuarto periodo donde se produjo la maduración entre los 210-270 ddf y otro fuerte incremento por 5 semanas, que se asocia con una rápida ganancia de materia seca mayor a 30 %, que se acumula a partir de los 210 días después del pico de floración, hasta su recolección final a los 270 ddf.

La Figura 8 responde a la siguiente ecuación  $y = 0.1339x^2 + 0.6458x + 19.741$   $R^2 = 0.9848$  representada en la Figura 9:

### Figura 9

Acumulación de peso seco de frutos en café cultivar IAC Obatá 1669-20 en 50 g de frutos frescos



En relación con ddf conforme avanza el tiempo existe una mayor acumulación de peso (gramos). De esta forma, en relación con el incremento de los frutos (ver Figuras 6, 7 y 8) y de acuerdo con Valarini *et. al*, (2005) se determina que conforme avanza el tiempo en días después del pico de floración, cuantos menos frutos y mayor crecimiento de estos, mayor peso se presenta por fruto.

### Concentración de nutrientes N, P, K, Ca y Mg en el fruto

La Tabla 4 muestra los valores promedio de las concentraciones de los macronutrientes N, P, K, Ca y Mg en el fruto en base seca, en función del tiempo. De acuerdo con Laviola *et. al*, (2007b) el promedio de la concentración de cada macronutriente mostró que el N y el K fueron los nutrientes de mayor concentración en el fruto, seguidos

por el Ca. Los contenidos de P y Mg fueron menores y similares. La mayor concentración de los macronutrientes N, P, K, Ca y Mg en los frutos se observó entre 30- 60 ddf.

**Tabla 4**

Variación estacional de la concentración de nutrientes en frutos de café en el cultivar IAC Obatá 1669-20 en San Marcos de Tarrazú, Costa Rica

| ddf        | CONCENTRACIÓN (%) |      |      |      |      |
|------------|-------------------|------|------|------|------|
|            | N                 | P    | K    | Ca   | Mg   |
| <b>30</b>  | 3.58              | 0.58 | 3.18 | 0.81 | 0.54 |
| <b>60</b>  | 3.51              | 0.38 | 3.08 | 0.69 | 0.34 |
| <b>90</b>  | 1.82              | 0.14 | 2.10 | 0.34 | 0.15 |
| <b>120</b> | 2.13              | 0.13 | 1.83 | 0.30 | 0.14 |
| <b>150</b> | 1.74              | 0.14 | 2.09 | 0.32 | 0.15 |
| <b>180</b> | 1.84              | 0.13 | 1.92 | 0.22 | 0.14 |
| <b>210</b> | 1.93              | 0.13 | 2.21 | 0.29 | 0.15 |
| <b>240</b> | 1.82              | 0.12 | 1.86 | 0.22 | 0.13 |
| <b>270</b> | 1.79              | 0.11 | 2.03 | 0.19 | 0.11 |

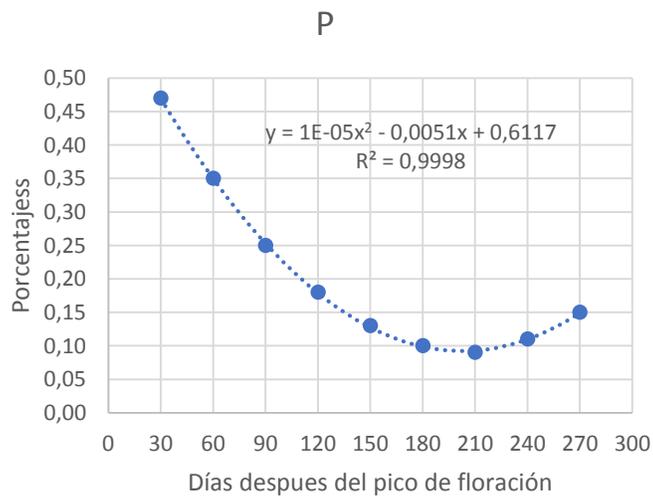
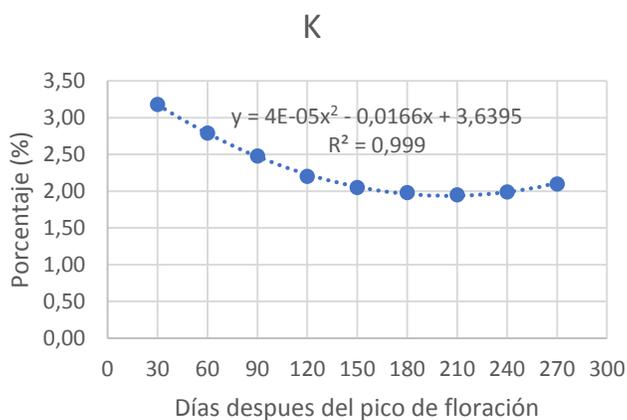
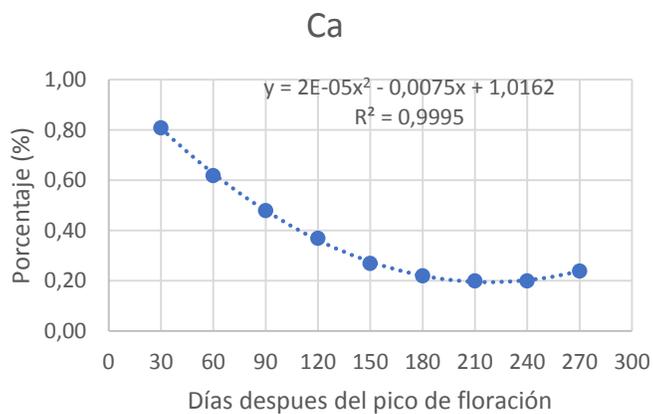
ddf: días después del pico de floración

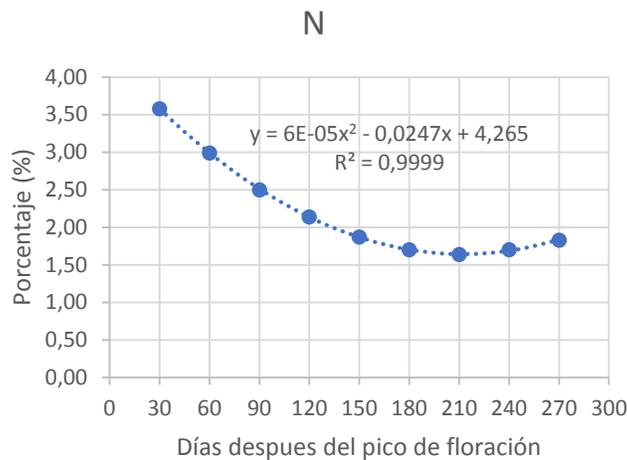
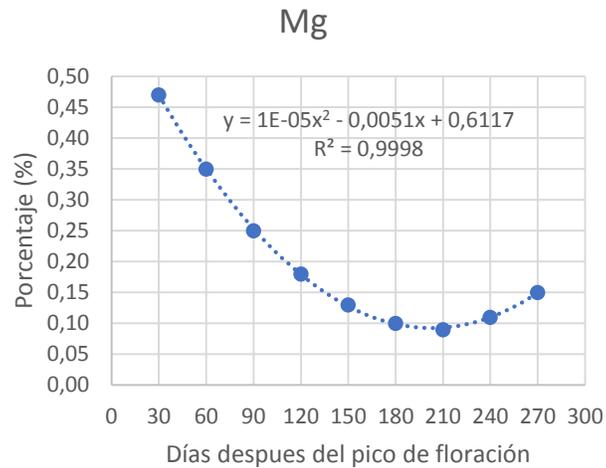
En cuanto a los macronutrientes, la concentración en los frutos presentó el siguiente orden decreciente,  $K > N > Ca > Mg > P$ , el cual coincide con Ramírez *et. al*, (2002). Además, en los frutos se presenta el K como el elemento con mayor concentración durante todo el ciclo de la cosecha, similar a lo encontrado por Sadeghian *et. al*, (2012).

En la Figura 10 se presentan las curvas de concentración de los macronutrientes N, P, K, Ca y Mg durante el crecimiento de los frutos de café.

**Figura 10**

Variación estacional de la concentración de N-P-K-Ca-Mg en los frutos





Se observó una disminución en las concentraciones de los macronutrientos al incrementar el crecimiento de los frutos a través del tiempo. Este comportamiento se conoce como efecto de dilución en su concentración y está asociado con el rápido crecimiento de los frutos (Souza *et. al*, 1975; Chaves y Sarruge, 1984; Laviola *et. al*, 2007b; Sadeghian *et. al*, 2012; y Sadeghian *et. al*, 2013).

#### **Extracción de los macronutrientos de N, P, K, Ca y Mg en los frutos de café**

Utilizando los datos del peso seco y con base en los datos de la concentración de los nutrientes consignados en la Tabla 4 se permite calcular la extracción de estos, por lo que se presenta la Tabla 5 con los datos que se obtuvieron. En la Tabla 5 se muestran los valores

promedios de las cantidades extraídas en gramos de los macronutrientes N, P, K, Ca y Mg, respectivamente, equivalentes a 10000 frutos de café.

**Tabla 5**

Cantidades extraídas de macronutrientes por el fruto del café, equivalentes a 10000 frutos

| Extracción<br>g/10000 frutos |      |      |      |      |      |
|------------------------------|------|------|------|------|------|
| ddf                          | N    | P    | K    | Ca   | Mg   |
| 30                           | 8.40 | 1.4  | 7.5  | 1.9  | 1.2  |
| 60                           | 16.6 | 1.3  | 14.5 | 3.0  | 1.2  |
| 90                           | 1.40 | -0.7 | 8.5  | -0.1 | -0.2 |
| 120                          | 14.0 | 0.5  | 4.2  | 0.7  | 0.5  |
| 150                          | 5.20 | 1.2  | 20.2 | 2.7  | 1.2  |
| 180                          | 15.0 | 0.5  | 8.5  | -1.0 | 0.8  |
| 210                          | 17.1 | 0.9  | 25.3 | 4.2  | 0.8  |
| 240                          | 7.7  | -0.4 | -1.6 | -1.3 | -0.4 |
| 270                          | 0.9  | 0.1  | 10.8 | -1.2 | -0.6 |

ddf: días después del pico de floración

Para el caso de la extracción del cultivar IAC Obatá 1669-20, similar al estudio de Bertsch (2009), el orden de absorción fue  $K > N > Ca > Mg > P$ . Según Sadeghian *et. al.* (2012), y Sadeghian *et. al.* (2013) existe una gran demanda de todos los nutrientes en los últimos 2 meses, en relación, para el caso del N y K, así como el caso del P, Ca y Mg habiendo absorbido más de un 50 % en los frutos para esta fecha.

Para el caso específico del café y su programa de nutrición se utiliza la medida de extracción por fanega de acuerdo con el Icafe (2020). Por lo tanto, se presenta la extracción de cada uno de los nutrimentos N, P, K, Ca y Mg mostrados en la Tabla 6.

Para los cálculos de extracción de nutrimentos por fanega se determinó la cantidad de nutrimentos absorbida por los frutos de café maduros en su etapa final a los 270 ddf, contenidos en un volumen de un litro. Posteriormente, se convirtió el resultado obtenido a una fanega, compuesta por 400 litros Icafe (2018b).

**Tabla 6**

Extracción de nutrimentos en una fanega de café incluido en kilogramos por frutos maduros en el cultivar IAC Obatá 1669-20

| <b>ddf</b> | <b>N</b>         | <b>P</b> | <b>K</b> | <b>Ca</b> | <b>Mg</b> |
|------------|------------------|----------|----------|-----------|-----------|
|            | <b>kg/fanega</b> |          |          |           |           |
| 270        | 1.29             | 0.08     | 1.46     | 0.13      | 0.09      |

ddf: días después del pico de floración

N: Nitrógeno      K: Potasio      Mg: Magnesio

P: Fosforo      Ca: Calcio

En cuanto a la extracción de nutrimentos presentados en la Tabla 5 para el cultivar IAC Obatá 1669-20, el orden de las cantidades extraídas por frutos maduros se conformó de la siguiente manera,  $K > N > Ca > Mg > P$ . Por consiguiente, se estableció que para una fanega de frutos maduros se necesitan 1.46 kg de K, 1.29 kg de N, 0.13 kg de Ca, 0.09 kg de Mg y 0.08 kg de P. De esta forma en comparación con Carvajal (1984) se presentan diferencias significativas en resultados obtenidos, presentando menores extracciones para todos los nutrimentos, principalmente para el caso del N.

Estos resultados permiten elaborar la Tabla 7, en la cual se presentan los valores de extracción de nutrimentos en relación con la cantidad de fanegas producidas según la producción que se puede obtener por hectárea (ha). Lo anterior con el propósito de ofrecer la

información necesaria para determinar el programa de fertilización del cultivo, que se basa en el conocimiento del consumo de nutrientes en una determinada finca bajo estas producciones. Por ende, es indispensable contar con la información de la producción y la extracción de los nutrientes del cultivo de café para recomendar la fertilización (Chaves, 2002).

Para efectos prácticos y de interpretación se presenta la Tabla 7 en la cual se refleja la extracción, para el tipo suelo ultisol y caracterización de la **Tabla 12** en anexos, de los nutrientes N, P, K, Ca y Mg en la medida de fanegas promedio producidas en el país (Icafe, 2020).

**Tabla 7**

Extracción por número de fanegas expresada en kilogramos de nutrientes N, P, K Ca y Mg por frutos maduros en el cultivar IAC Obatá 1669-20

| <b>Fanegas</b> | <b>N</b>         | <b>P</b>   | <b>K</b>     | <b>Ca</b>   | <b>Mg</b>  |
|----------------|------------------|------------|--------------|-------------|------------|
|                | <b>kg/fanega</b> |            |              |             |            |
| <b>20</b>      | <b>25.7</b>      | <b>1.6</b> | <b>29.2</b>  | <b>2.7</b>  | <b>1.7</b> |
| <b>40</b>      | <b>51.4</b>      | <b>3.2</b> | <b>58.4</b>  | <b>5.4</b>  | <b>3.3</b> |
| <b>60</b>      | <b>77.2</b>      | <b>4.7</b> | <b>87.5</b>  | <b>8</b>    | <b>4.8</b> |
| <b>80</b>      | <b>102.9</b>     | <b>6.3</b> | <b>116.7</b> | <b>10.7</b> | <b>6.4</b> |
| <b>100</b>     | <b>128.6</b>     | <b>7.9</b> | <b>145.9</b> | <b>13.4</b> | <b>8.0</b> |

Las extracciones durante todo el periodo de los frutos maduros del cultivar IAC Obatá 1669-20, para el caso de las extracciones por el número de fanegas en kilogramos de los nutrientes el N y K, en comparación con el P, Ca y Mg, son mayores y los de K se caracterizaron por ser cada vez más altos que los de N a partir de las 20 fanegas, hasta las 100 fanegas.

En busca de una herramienta que facilite el uso práctico y funcione como una guía de la fertilización del cultivar IAC Obatá 1669-20 se presenta la Tabla 8 con los nutrientes N, P, K, Ca y Mg en su forma tradicional de presentación comercial o como se encuentra en el

fertilizante. Está de acuerdo con el tipo suelo ultisol y caracterización de la **Tabla 12** en anexos.

**Tabla 8**

Extracción por número de fanegas expresada en kilogramos de nutrimentos N, P, K Ca y Mg en su forma tradicional de presentación comercial en frutos maduros en el cultivar IAC Obatá 1669-20

| <b>Fanegas</b> | <b>N</b>     | <b>P2O5</b><br><b>kg/fanega</b> | <b>K2O</b>   | <b>CaO</b>  | <b>MgO</b>  |
|----------------|--------------|---------------------------------|--------------|-------------|-------------|
| <b>20</b>      | <b>25.7</b>  | <b>3.7</b>                      | <b>35</b>    | <b>3.7</b>  | <b>3</b>    |
| <b>40</b>      | <b>51.4</b>  | <b>7.2</b>                      | <b>70</b>    | <b>7.5</b>  | <b>5.9</b>  |
| <b>60</b>      | <b>77.2</b>  | <b>10.8</b>                     | <b>105</b>   | <b>11.2</b> | <b>8.9</b>  |
| <b>80</b>      | <b>102.9</b> | <b>14.5</b>                     | <b>140</b>   | <b>15</b>   | <b>11.8</b> |
| <b>100</b>     | <b>128.6</b> | <b>18.1</b>                     | <b>175.1</b> | <b>18.7</b> | <b>14.8</b> |

#### **Acumulación relativa de N, P, K, Ca y Mg en los frutos de café**

Al expresar la acumulación de N, P, K, Ca y Mg en el fruto de café en términos relativos, es decir, se toma como punto de referencia el 100 % de lo absorbido, es posible identificar algunas tendencias. Para el conjunto de los 5 nutrimentos N, P, K, Ca y Mg se puede afirmar que la acumulación relativa durante los primeros 90 ddf representó un poco más del 30% para N, P y K, más del 45% para Ca y 50 % para Mg y que a partir de los 90 ddf y hasta los 180 días, en promedio, en el fruto se acumuló entre el 35 % y 40 % de estos elementos, con excepción del Ca, que fue menor.

En los últimos 2 meses previos a la cosecha el fruto acumuló el 25 %, esto con excepción del Ca que presenta una disminución en su acumulación entre los 240 ddf y 270 ddf de un 14 %, por otra parte, para el estudio de Ramírez *et. al*, (2002), quienes encontraron que para la variedad Caturra el 50 % de los requerimientos totales de nutrientes, a excepción de K, son consumidos por el fruto durante los primeros 90 ddf. En el caso de esta condición no concuerda con lo hallado para el cultivar IAC Obatá 1669-20 estudiado en San Marcos de Tarrazú.

Como era de esperarse, la acumulación de N, P, K, Ca y Mg en el fruto presentó una tendencia similar a la observada para la biomasa fresca y seca (Figura 8). Durante todo el periodo del desarrollo de los frutos fueron mayores las acumulaciones de N (ver Figura 11) en promedio 12 veces a la cantidad de gramos extraídos en los 10000 frutos y de K (ver Figura 13), en promedio 15 veces a la cantidad de gramos extraídos en los 10000 frutos. Lo anterior en relación con las acumulaciones de P (ver Figura 12), 3 veces en promedio a la cantidad de gramos extraídos en los 10000 frutos, al Ca (ver Figura 14) y Mg (ver Figura 15) de esta forma respectivamente. Los de K se caracterizaron por ser cada vez más altos que los de N en el total del ciclo evaluado.

Durante el periodo de crecimiento o desarrollo de los frutos de café cultivar IAC Obatá 1669-20 se observó el siguiente orden en la acumulación de los elementos,  $K > N > Ca > Mg > P$ . Los estudios realizados por Ramírez *et. al*, (2002) y Sadeghian *et. al*, (2013) reportan un mismo orden con respecto a las acumulaciones en otros cultivares. En el caso propio del IAC Obatá 1669-20, en comparación con la variedad Caturra que es de las más reconocidas en el país, presenta un comportamiento de requerimientos de la siguiente forma  $K > N > Ca > Mg > P$ , igual que la variedad Castillo que es un Sarchimor. A la vez, al igual que el IAC Obatá 1669-20 presenta que las exigencias y características de los elementos nutritivos que requiere tienen el mismo orden según García (2007, citado en Rojas Rojas y Avellán Gámez, 2015): El potasio representa uno de los principales elementos que la planta extrae, para complementar su nutrición y alcanzar un rendimiento alto y de buena calidad. Este elemento, es siempre cuantitativamente importante en las cenizas vegetales representando del 25 al 50% en peso seco. De esta forma, según Sancho (1999, citado en Rojas Rojas y Avellán Gámez, 2015): indica que conociendo el comportamiento de la acumulación de este nutrimento se determinan las épocas de mayor extracción de nutrimentos durante el ciclo de crecimiento, (p. 19).

Además, de acuerdo con García (2007, citado en Rojas Rojas y Avellán Gámez, 2015): En los suelos de Costa Rica y propiamente para la zona de los Santos, los contenidos de potasio son relativamente altos, y por consiguiente, no deberían de existir problemas en el abastecimiento de este nutriente (excepción en suelos arenosos), no obstante, es necesario tener en cuenta algunas consideraciones como los posibles efectos que provoca el exceso de

K en la asimilación de Mg y/o Ca por efecto de antagonismo (relación entre las bases) y asimismo que cantidades adecuadas de potasio contribuyen con la absorción de otros elementos como en nitrógeno contribuyendo con el aumento de los rendimientos (p. 17); de acuerdo con el Icafe (2013).

### **Momentos de mayor demanda de los elementos N, P, K, Mg y Ca en los frutos**

Gracias a los estudios de curvas de absorción es fácil establecer diferencias entre el comportamiento de variedades de un mismo cultivo. Según Dávila (2012, citado en Rojas Rojas y Avellán Gámez, 2015): “Las plantas de café pasan por etapas fisiológicas, y en cada una de ellas requiere de nutrimentos para cubrir las demandas puntuales en el momento que los requiere de acuerdo a su crecimiento y desarrollo” (p. 16). Por esta razón, se determinaron los momentos de mayor consumo y demanda para cada nutrimento, en los cuales se tomaron en cuenta los factores que Riaño *et. al.*, (2004) plantean como: “1) las exigencias de la planta (especie y variedad), 2) el nivel de producción, 3) las propiedades de suelo, 4) los componentes ambientales y 5) el manejo” (s. p.).

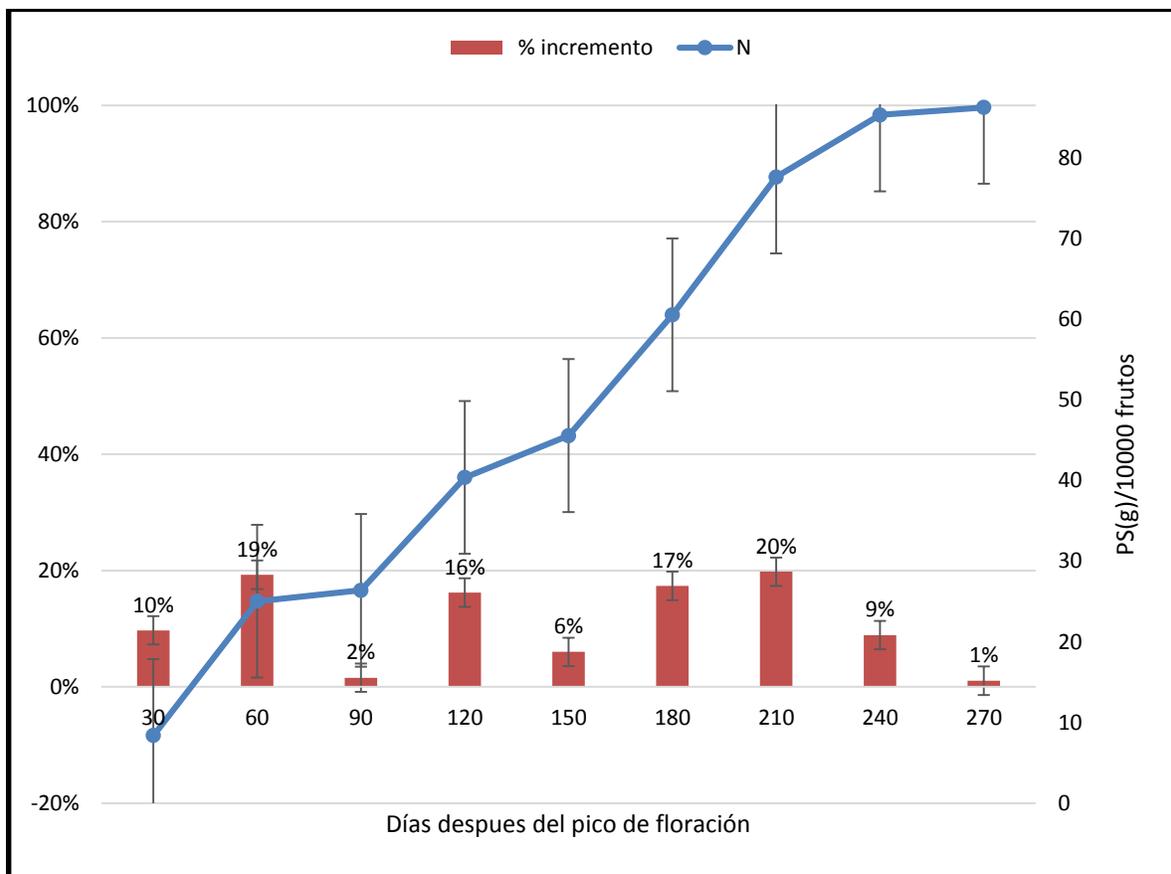
Según Salazar *et. al.*, (1994) la acumulación de nutrimentos en la biomasa incrementa conforme aumenta el crecimiento de los frutos. La acumulación de los macronutrimentos N, P, K, Ca y Mg por el fruto a través del tiempo se presenta en las gráficas para cada elemento en las cuales se utilizaron 10000 frutos (Figuras 11, 12, 13, 14 y 15) y resulta de multiplicar la concentración del elemento (en porcentaje) por los datos de peso seco del fruto (gramos), a través de la variación en el tiempo en base a 10000 frutos, en forma mensual a partir de la floración hasta los 270 ddf.

#### **Nitrógeno**

A continuación, en la Figura 11 se muestra la cantidad extraída de nitrógeno (N) por los frutos de café en función del tiempo transcurrido, después del día pico de la floración.

**Figura 11**

Cantidad extraída de nitrógeno (N) por los frutos de café en función del tiempo transcurrido, después del día pico de la floración



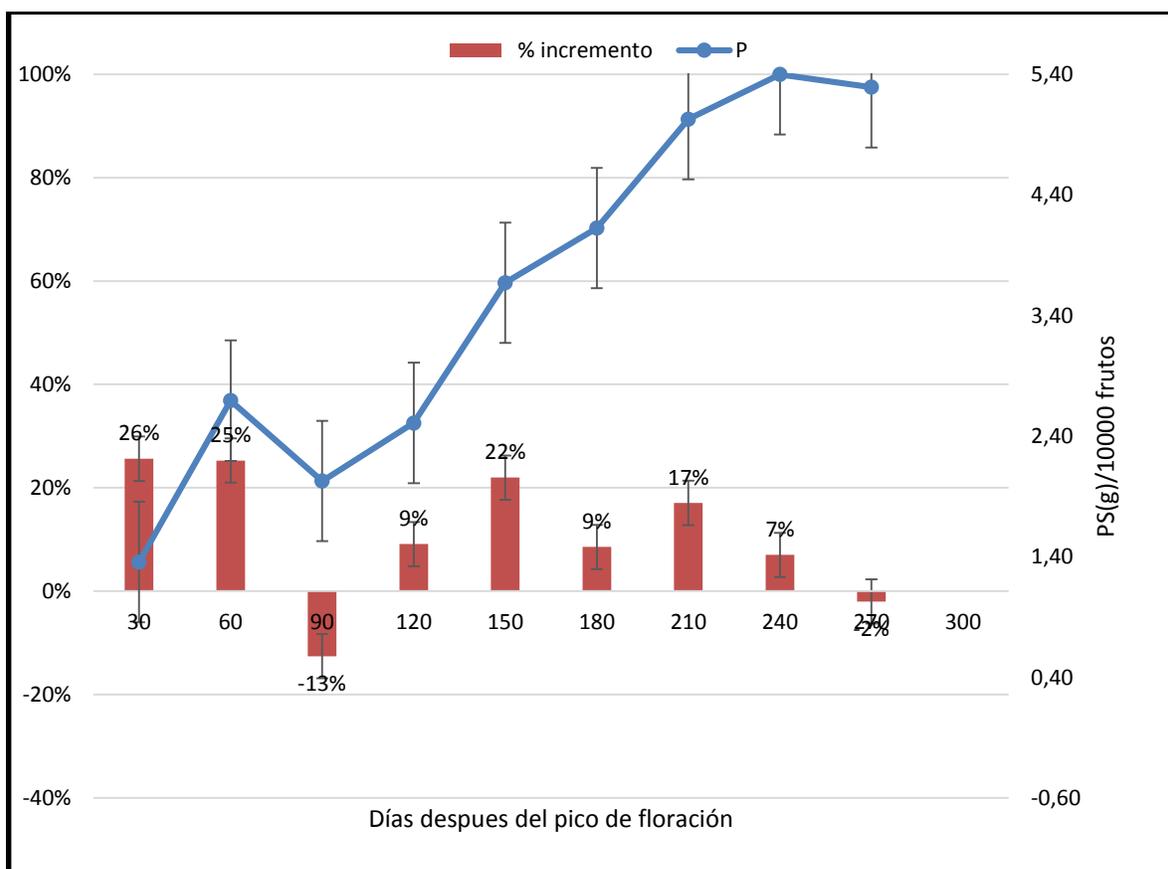
En cuanto al nitrógeno (ver Figura 11), los momentos de mayor extracción se establecen a los 60 y 210 días después del pico de floración. Para el caso de los 60 ddf representa casi un 30 % de la extracción total acumulada a lo largo del ciclo de la formación del fruto, el cual extrae 25 g del elemento en 10000 frutos. Asimismo, se establece que en comparación con los 30 ddf existe un incremento en la extracción en 30 días de un 19 % y que para el caso de los 210 ddf representa un 90 % de la extracción total acumulada a lo largo del ciclo de la formación del fruto, el cual extrae 76,7 g del elemento en 10000 frutos. Además, se determina que en comparación con los 180 ddf existe un incremento en la extracción de un 20 %. Para este estudio y para el cultivar IAC Obatá 1669-20 se presentan diferencias con lo encontrado por Ramírez *et. al*, (2002) en la variedad Caturra.

## Fósforo

A continuación, en la Figura 12 se muestra la cantidad extraída de fósforo (P) por los frutos de café en función del tiempo transcurrido, después del día pico de la floración.

**Figura 12**

Cantidad extraída de fósforo (P) por los frutos de café en función del tiempo transcurrido, después del día pico de la floración



En el caso de la extracción de fósforo (ver Figura 12), los momentos de mayor extracción se establecen a los 30 y 60 días después del pico de floración. Para el caso de los 30 ddf representa casi un 20 % de la extracción total acumulada a lo largo del ciclo de la formación del fruto, el cual extrae 1,40 g del elemento en 10000 frutos. Asimismo, se establece que en comparación con los 0 ddf existe un incremento en la extracción en 30 días de un 26 % y que para el caso de los 60 ddf representa un 51 % de la extracción total acumulada a lo largo del ciclo de la formación del fruto, el cual extrae 2,70 g del elemento

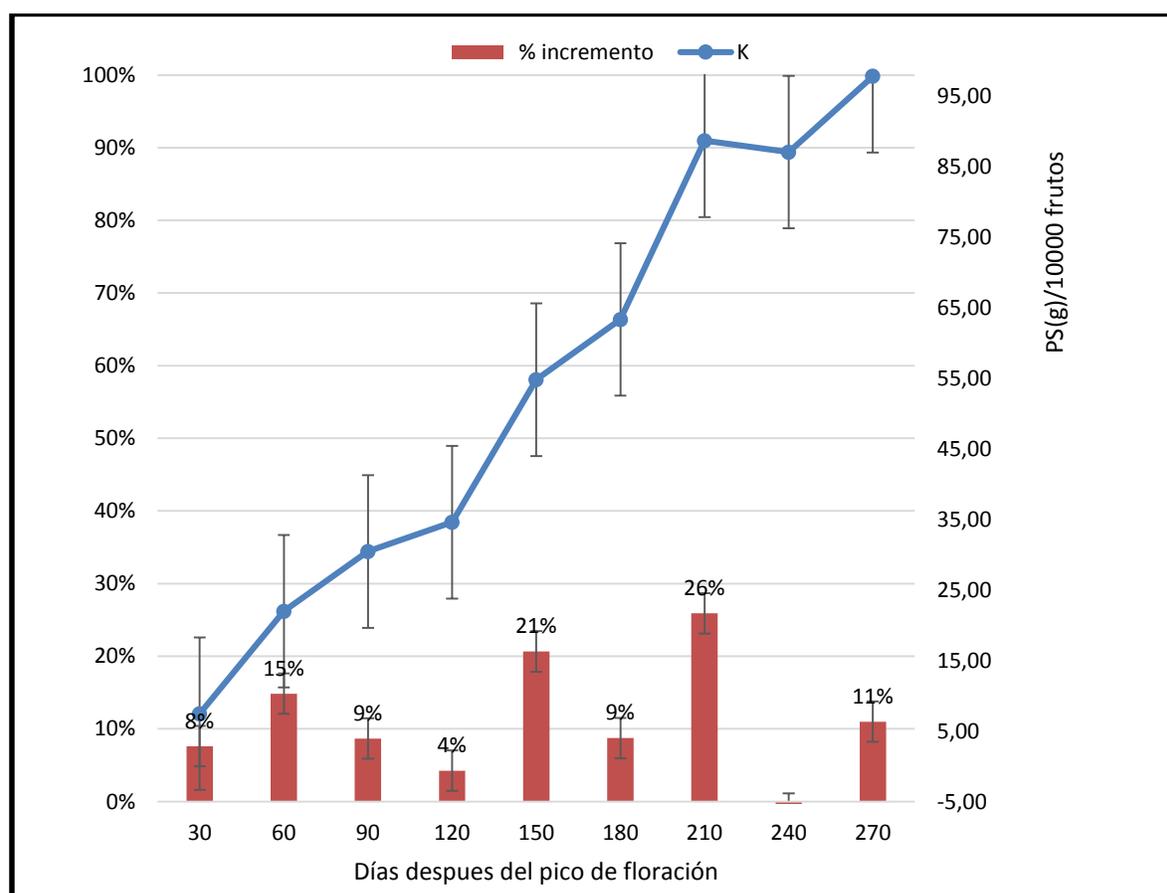
en 10000 frutos. Además, se determina que en comparación con los 30 ddf existe un incremento en la extracción de un 25 %. De acuerdo con lo encontrado por Sadeghian *et. al*, (2012), el cultivar IAC Obatá 1669-20 concuerda con lo encontrado en el cultivar Castillo.

### Potasio

A continuación, en la Figura 13 se muestra la cantidad extraída de potasio (K) por los frutos de café en función del tiempo transcurrido, después del día pico de la floración.

**Figura 13**

Cantidad extraída de potasio (K) por los frutos de café en función del tiempo transcurrido, después del día pico de la floración



En cuanto al potasio (ver Figura 13), los momentos de mayor extracción se establecen a los 150 y 210 días después del pico de floración. Con respecto a los 150 ddf, representa un 57 % de la extracción total acumulada a lo largo del ciclo de la formación del fruto, el cual extrae 54,9 g del elemento en 10000 frutos. Asimismo, se establece que en comparación con

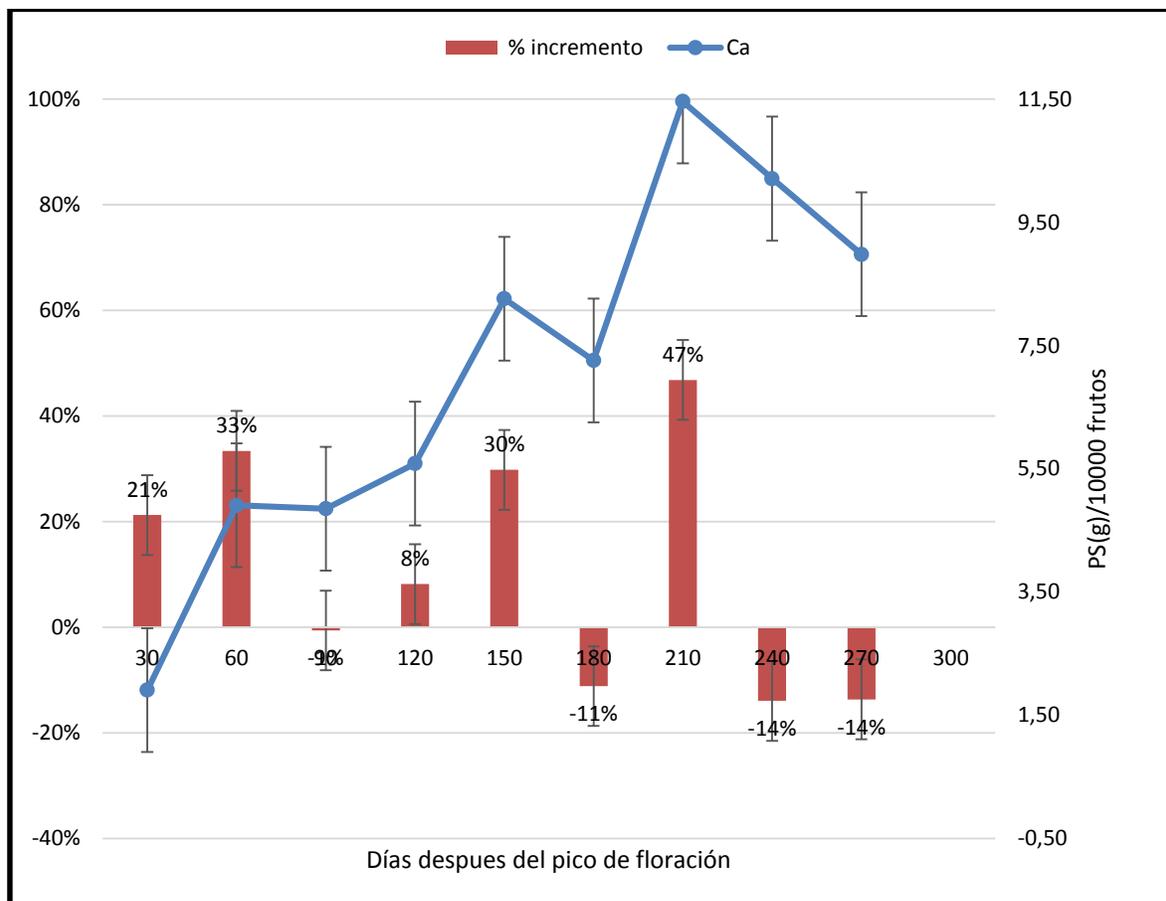
los 120 ddf existe un incremento en la extracción en 30 días de un 21 % y que para el caso de los 210 ddf representa un 92 % de la extracción total acumulada a lo largo del ciclo de la formación del fruto, el cual extrae 88,7 g del elemento en 10000 frutos. Además, se establece que en comparación con los 180 ddf existe un incremento en la extracción de un 26 %. Para este estudio y para el cultivar IAC Obatá 1669-20, se presentan diferencias con lo encontrado por Ramírez *et. al*, (2002) en la variedad Caturra.

### **Calcio**

En la Figura 14 se muestra la cantidad extraída de calcio (Ca) por los frutos de café en función del tiempo transcurrido, después del día pico de la floración.

**Figura 14**

Cantidad extraída de calcio (Ca) por los frutos de café en función del tiempo transcurrido, después del día pico de la floración



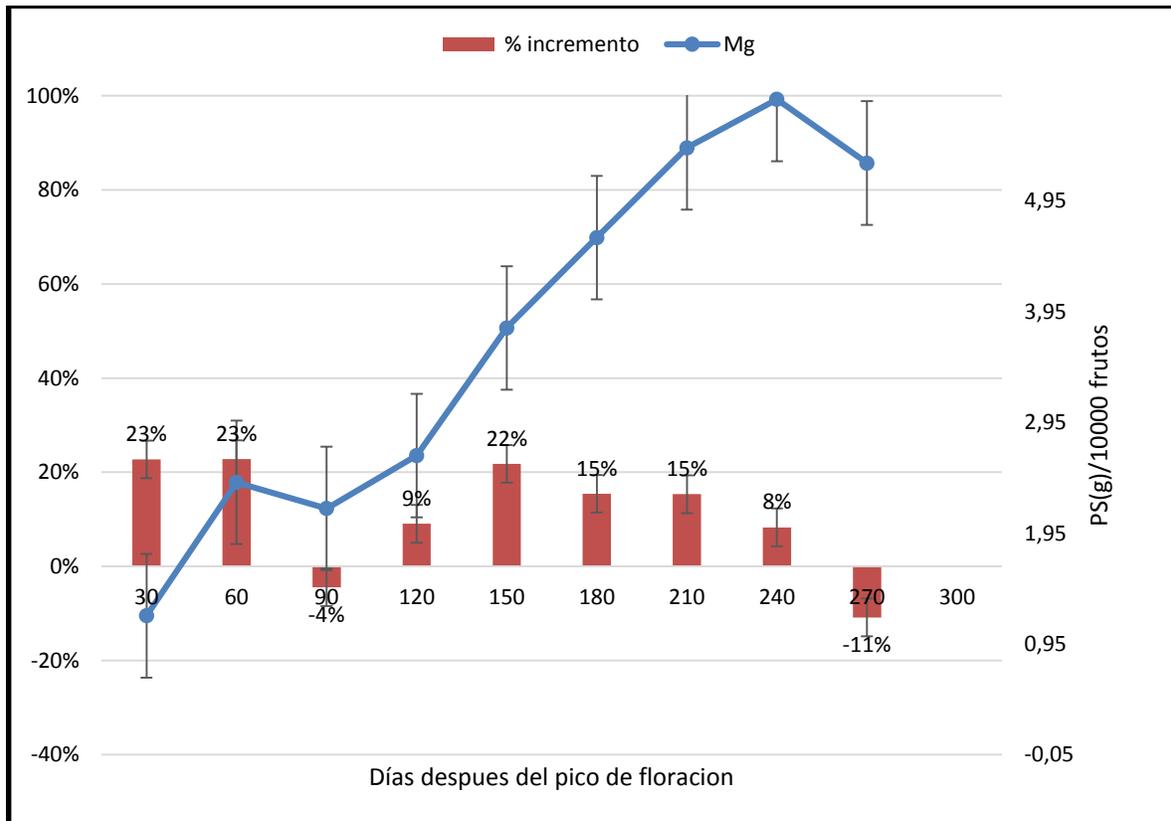
En cuanto al calcio (ver Figura 14), los momentos de mayor extracción se establecen a los 60 y 210 días después del pico de floración. Para los 60 ddf representa un 35 % de la extracción total acumulada a lo largo del ciclo de la formación del fruto, el cual extrae 4.9 g del elemento en 10000 frutos. Asimismo, se establece que en comparación con los 30 ddf existe un incremento en la extracción en 30 días de un 33 % y que para el caso de los 210 ddf representa un 98 % de la extracción total acumulada a lo largo del ciclo de la formación del fruto, el cual extrae 13,6 g del elemento en 10000 frutos. Además, se establece que en comparación con los 180 ddf existe un incremento en la extracción de un 47 %. Según lo encontrado por Sadeghian *et. al*, (2013), el cultivar IAC Obatá 1669-20 concuerda con lo encontrado en el cultivar Castillo.

## Magnesio

A continuación, en la Figura 15 se muestra la Cantidad extraída de magnesio (Mg) por los frutos de café en función del tiempo transcurrido, después del día pico de la floración.

**Figura 15**

Cantidad extraída de magnesio (Mg) por los frutos de café en función del tiempo transcurrido, después del día pico de la floración



En el caso de la extracción de magnesio (ver Figura 15), se establece que durante los 30 y 60 días después del pico de floración, en la etapa inicial de la formación del fruto, se encuentran los momentos de mayor absorción del fruto, lo que a los 30 ddf representa alrededor de un 22 % de la extracción total acumulada a lo largo del ciclo de la formación del fruto. Asimismo, extrae 1,2 g de Mg en 10000 frutos, lo cual representa un incremento de extracción entre los 0 y 30 ddf de un 26 %. En cuanto a los 60 ddf, representa un 30 % de la extracción total acumulada extrayendo del elemento 2,4 g en 10000 frutos, de esta forma, de los 30 ddf a los 60 ddf se genera un incremento de extracción de un 23 %. Según lo

encontrado por Sadeghian *et. al*, (2013), el cultivar IAC Obatá 1669-20 concuerda con lo encontrado en el cultivar Castillo.

Con respecto al estudio realizado sobre el consumo de nutrimentos conforme a la etapa de crecimiento de los frutos y concentración de nutrimentos, en relación con los días después del pico de floración, se presenta la Tabla 9 como propuesta de acompañamiento de un programa o guía de manejo nutricional del cultivar IAC Obatá 1669-20 para las condiciones de San Marcos de Tarrazú, San José, Costa Rica.

**Tabla 9**

*Programa de fertilización de acompañamiento para el complemento nutricional del cultivar IAC Obatá 1669-20*

| Fecha de aplicación (ddf) |            | Nutrimento |    |    |      |    |
|---------------------------|------------|------------|----|----|------|----|
| Días                      | Meses      | + Orden -  |    |    |      |    |
| 30                        | junio      | N          | K  | Ca | P    | Mg |
| 60                        | julio      | N          | K  | Ca | P    | Mg |
| 90                        | agosto     | K          | N  | P  | Mg   | Ca |
| 120                       | septiembre | N          | K  | Ca | Mg=P |    |
| 150                       | octubre    | K          | N  | Ca | Mg=P |    |
| 180                       | noviembre  | N          | K  | Ca | Mg   | P  |
| 210                       | diciembre  | K          | N  | Ca | P    | Mg |
| 240                       | enero      | N          | K  | Ca | Mg=P |    |
| 270                       | febrero    | K          | Ca | N  | Mg   | P  |

A partir de la Tabla 9 se establece la absorción de los nutrimentos con un orden decreciente en relación con el tiempo días después del pico de floración (Figuras 10, 11, 12, 13 y 14), lo que permite determinar las épocas de aplicación de los fertilizantes en los programas de fertilización. De esta forma, deberían aplicarse los fertilizantes unas 2 semanas antes de los 60 y 210 días después de la floración, punto en el cual inicia un alto requerimiento de nutrientes. Con esto se logra maximizar el uso y aprovechamiento de los fertilizantes (Sancho, 1999, citado en Rojas Rojas y Avellán Gámez, 2015).

## Curvas de variación estacional de N, P, K, Mg y Ca en las hojas

Se determinó la concentración foliar, lo cual permite comprender el movimiento y requerimiento en momentos determinantes, además de realizar una comparación tejido foliar y frutos para efectos de entender mejor la absorción de la planta (Pezzopane *et. al*, 2003)

### Concentración foliar de N, P, K, Ca y Mg

En la Tabla 10 se presentan los valores de las concentraciones de nutrimentos en las hojas de café muestreadas y analizadas. Durante el tiempo comprendido entre la floración y la cosecha de los frutos, el nitrógeno fue el nutrimento que mostró la mayor concentración, seguido por el potasio. Además, el calcio mostró concentraciones menores al nitrógeno y potasio y los contenidos de magnesio y fósforo fueron menores a los de calcio, con promedios inferiores a 0.45 %.

**Tabla 10**

Variación estación de nutrimentos a nivel foliar (hojas) de café cultivar IAC Obatá 1669-20 en San Marcos de Tarrazú, Costa Rica

| Unidad de medición |      | Concentración (%) |      |      |      |
|--------------------|------|-------------------|------|------|------|
| ddf                | N    | P                 | K    | Ca   | Mg   |
| 30                 | 2.62 | 0.39              | 2.39 | 1.60 | 0.43 |
| 60                 | 2.59 | 0.19              | 2.29 | 1.00 | 0.23 |
| 90                 | 2.67 | 0.17              | 2.05 | 1.27 | 0.20 |
| 120                | 2.72 | 0.20              | 1.99 | 1.63 | 0.27 |
| 150                | 2.57 | 0.18              | 1.56 | 1.70 | 0.18 |
| 180                | 2.59 | 0.12              | 1.56 | 1.56 | 0.22 |
| 210                | 2.54 | 0.14              | 1.84 | 1.58 | 0.22 |
| 240                | 2.76 | 0.16              | 2.16 | 1.87 | 0.26 |
| 270                | 2.71 | 0.11              | 1.73 | 1.03 | 0.17 |

Por otro lado, el N (ver Figura 16) fue constante en la mayoría de sus concentraciones y, en contraste, el K (ver Figura 18) tendió a reducirse. Este resultado puede relacionarse, en parte, debido a la mayor demanda de K por los frutos y a la forma en la que se encuentra en los tejidos, pues este no forma compuestos y, por lo tanto, permanece como ion libre, lo que facilita su movilización (Lima Filho y Malavolta, 2003). De acuerdo con Herber y Kraemer (2010), durante la formación del fruto existe una mayor removilización de K con respecto a N, Ca, Mg y P desde los tejidos foliares más nuevos. Cabe aclarar que esta condición con el K no se presentó para el cultivar IAC Obatá 1669, debido al crecimiento tan acelerado que presentó el comportamiento de los frutos en este cultivar, y para estas condiciones, además de coincidir con los momentos de mayor demanda de extracción en el fruto. Aunque la concentración en las hojas de P (ver Figura 17), Ca (ver Figura 19) y Mg (ver Figura 20) presentó algunas variaciones a través del tiempo, no hubo una relación entre los cambios detectados y el avance en el crecimiento y desarrollo del fruto.

En el trabajo desarrollado por Laviola et. al, (2008), no se encontraron evidencias claras que pudieran justificar la removilización de N, P, K, Ca y Mg desde las hojas, mientras que Chaves y Sarruge (1984) demostraron la relación entre estos nutrimentos en la fuente (hoja) y en el vertedero (frutos). En este mismo sentido, Lima Filho y Malavolta (2003) hallaron que, en plantas sin deficiencias nutricionales, entre 47% y 58% de N, y de 54% a 64% de K exportado por los frutos proviene de las hojas (Sadeghian et. al, 2012, p. 31).

En cuanto a los resultados, pese a cierta similitud en la concentración de los nutrimentos, puede variar entre sitios. De acuerdo con las condiciones en las cuales se desarrolló esta investigación y según los estudios realizados por Bertsch (2003, 2005 y 2009), donde se evalúan materiales como el Caturra y Catuai, en comparación con el IAC Obatá 1669-20, se determinó que la concentración de cada uno de los elementos (N, P, K, Ca y Mg) presenta alrededor de un 20 % más, esto tanto a nivel foliar como en los frutos. Por consiguiente: Los estudios desarrollados por Laviola et. al, (2007a y 2008) confirman lo expuesto, al demostrar que la acumulación de macronutrientes cambia de acuerdo con la temperatura, factor climático afectado por la altitud.

Con los datos de concentración (ver Tabla 10) se desarrollaron las curvas de concentración de nutrimentos de variación estacional para cultivar IAC Obatá 1669-20 en San Marcos de Tarrazú, Costa Rica.

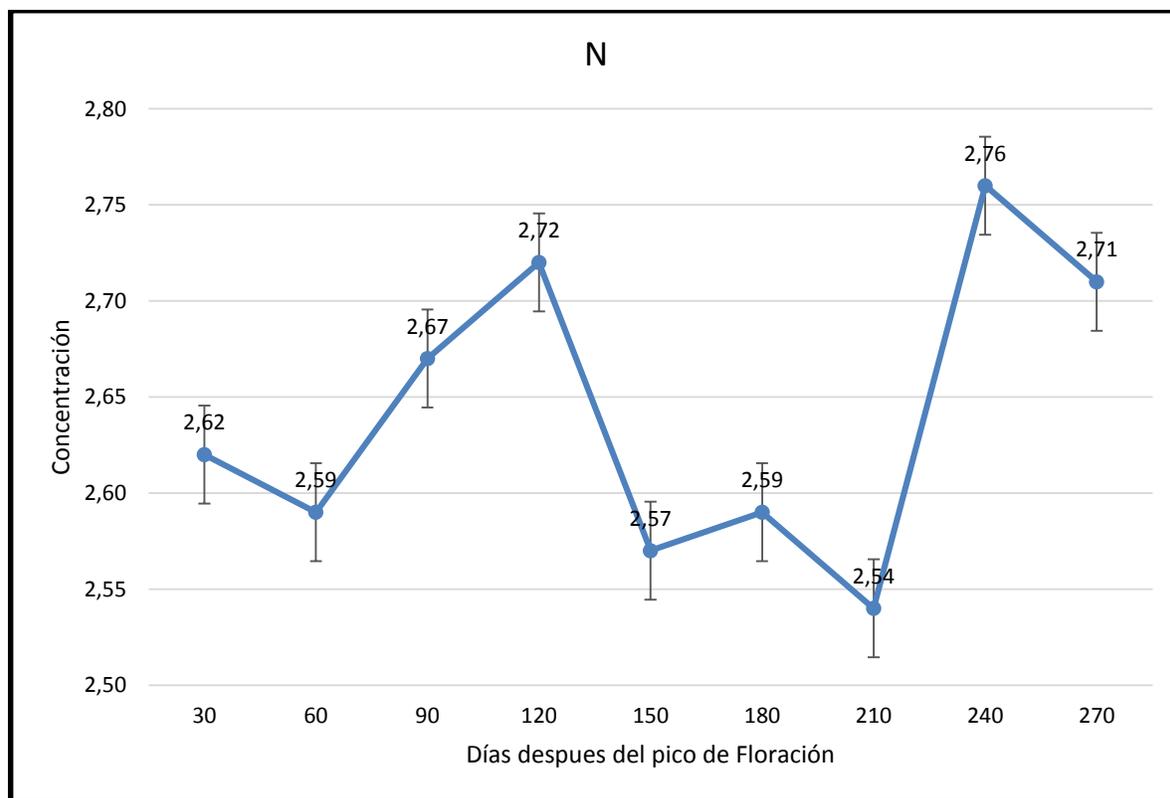
### Nitrógeno

A continuación, en la Figura 16 se presentan las concentraciones (%) foliares de nitrógeno (N) en función de tiempo transcurrido, después del día pico de la floración.

#### Figura 16

Concentraciones (%) foliares de nitrógeno (N) en función de tiempo transcurrido, después del día pico de la floración

La Figura 16, presenta en el caso del N, que se mantuvieron buenas concentraciones foliares de acuerdo con Bataglia et. al, (2004). En relación con el comportamiento de las concentraciones de los frutos y variación estacional de la cantidad extraída del nutrimento, Figura 11, se da una disminución de la concentración foliar entre los 150 ddf a 210 ddf, coincidiendo con la etapa de mayor extracción de los frutos.



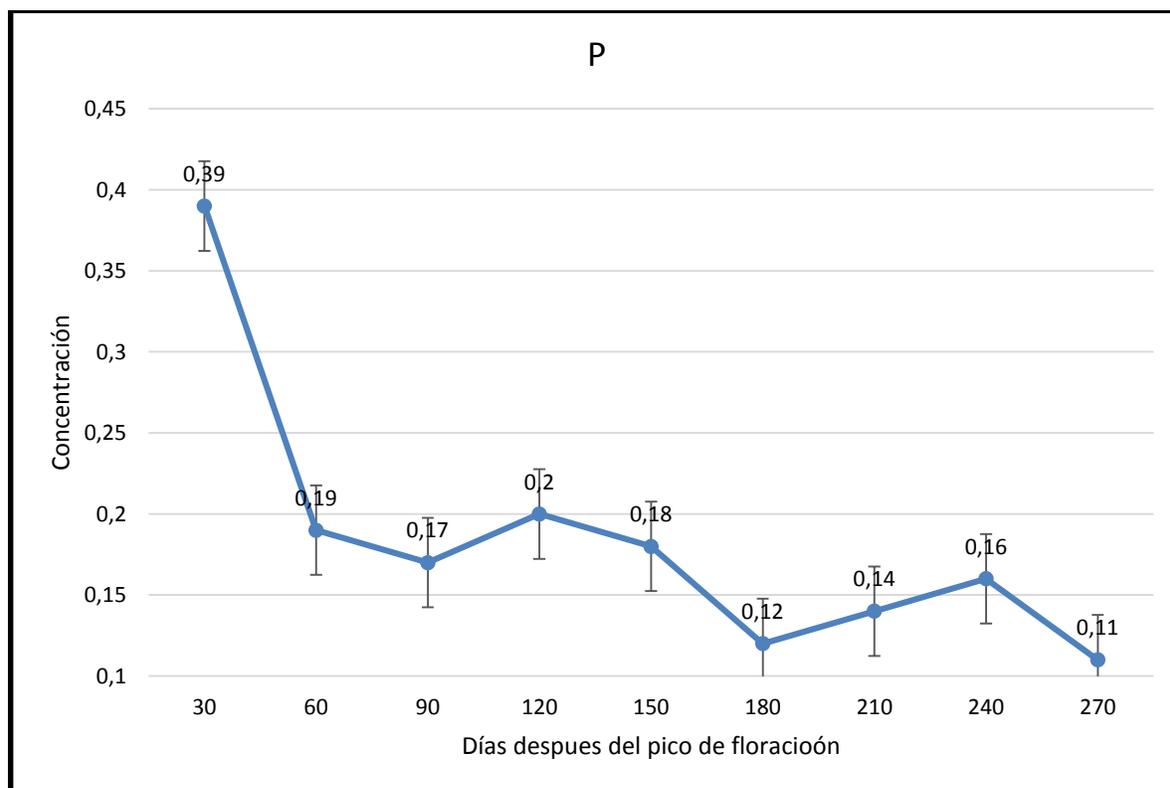
## Fósforo

En la Figura 17 se pueden observar las concentraciones (%) foliares de fósforo (P) en función de tiempo transcurrido, después del día pico de la floración.

Para el caso de la Figura 17, se presenta en el P, que se mantuvieron buenas concentraciones foliares solo a los 30 ddf y posterior a su avance en el tiempo fueron normales. De acuerdo con Parra (2018), para los 180 ddf y 270 ddf fueron deficientes. En relación con el comportamiento de las concentraciones de los frutos y variación estacional de la cantidad extraída del nutrimento, Figura 12, no presenta una disminución de la concentración foliar entre los 30 ddf a 60 ddf, de esta forma no se coincide en la etapa de mayor extracción de los frutos.

### Figura 17

Concentraciones (%) foliares de fósforo (P) en función de tiempo transcurrido, después del día pico de la floración



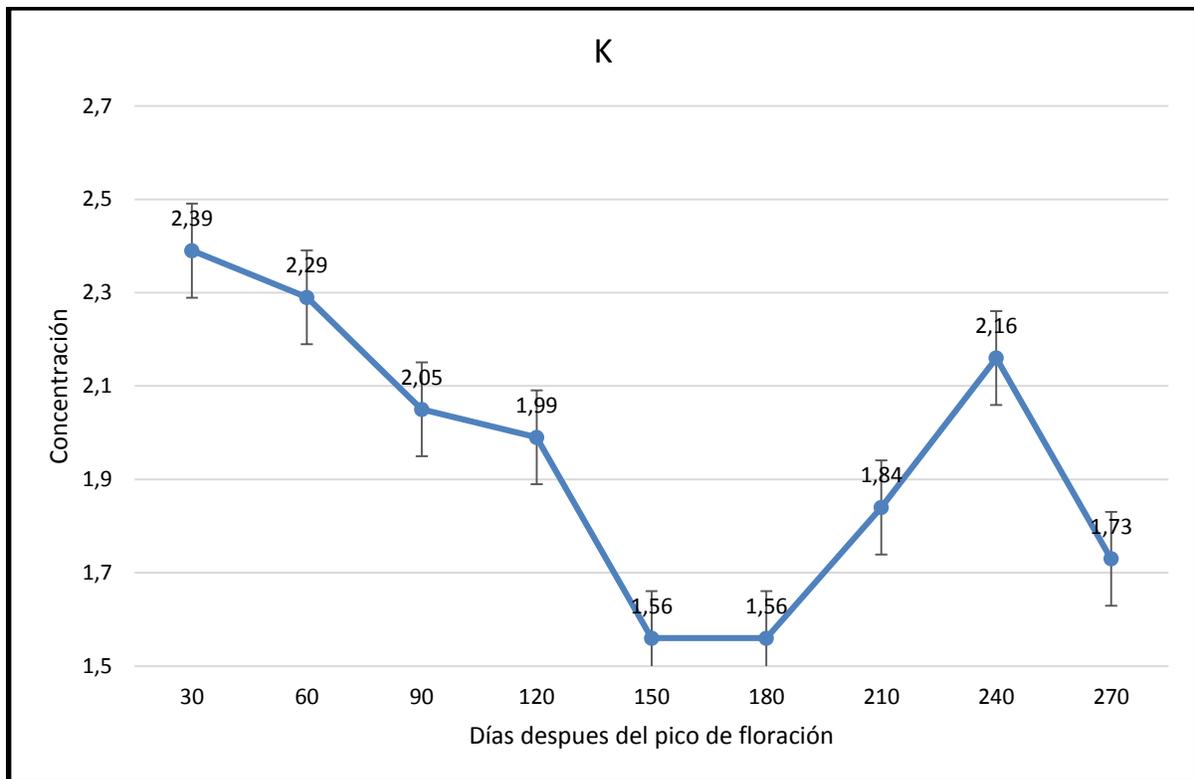
## Potasio

En la Figura 18 se presentan las concentraciones (%) foliares de potasio (K) en función de tiempo transcurrido, después del día pico de la floración.

La Figura 18, presenta en el caso del K, que se mantuvieron buenas concentraciones foliares de acuerdo con Rincón (2019). En relación con el comportamiento de las concentraciones de los frutos y variación estacional de la cantidad extraída del nutrimento, Figura 13, se da una disminución de la concentración foliar entre los 150 ddf a 210 ddf, coincidiendo en la etapa de mayor extracción de los frutos.

### Figura 18

Concentraciones (%) foliares de potasio (K) en función de tiempo transcurrido, después del día pico de la floración



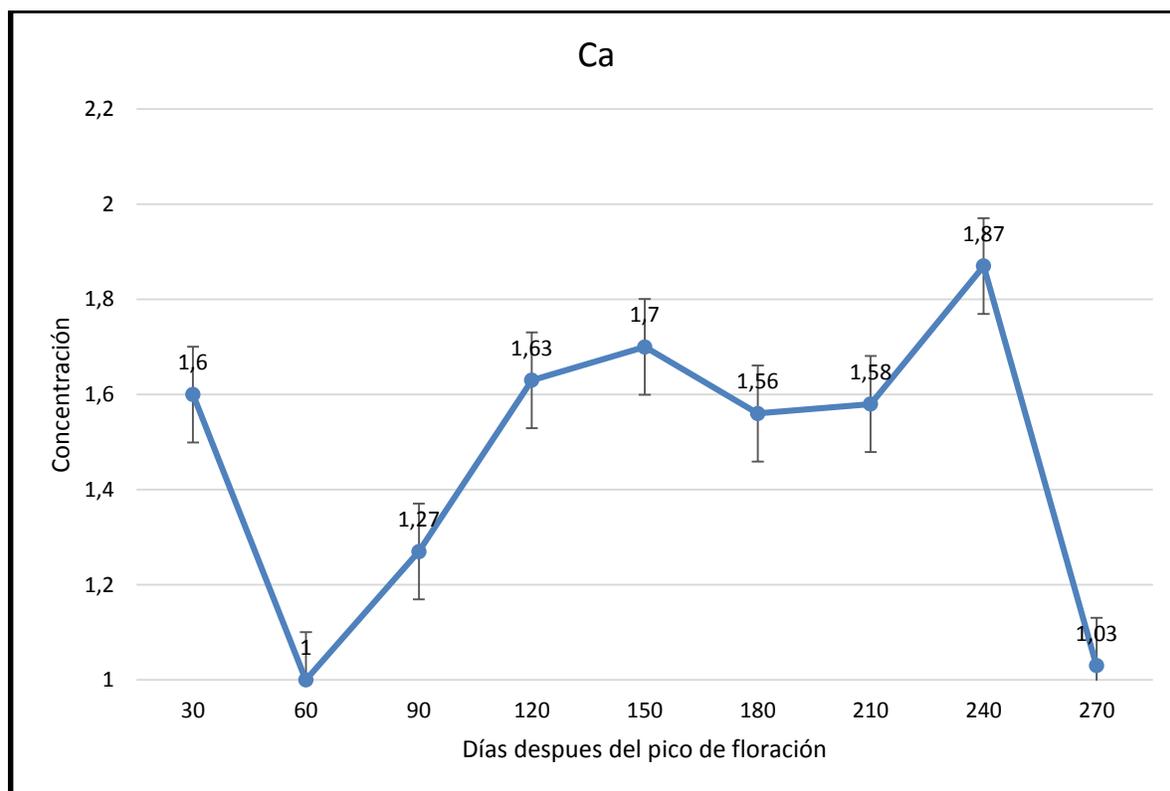
## Calcio

A continuación, en la Figura 19 se muestran las concentraciones (%) foliares de calcio (Ca) en función de tiempo transcurrido, después del día pico de la floración.

Para la Figura 19, presenta en el caso del Ca, que se mantuvieron buenas concentraciones foliares de acuerdo con Bataglia et. al, (2004). En relación con el comportamiento de las concentraciones de los frutos y variación estacional de la cantidad extraída del nutrimento, Figura 14, se da una disminución de la concentración foliar entre los 60 ddf coincidiendo en una de las etapas de mayor extracción de los frutos, sin embargo, para el caso de los 210 ddf, no se presenta una relación entre las concentraciones foliares del Ca y la extracción de los frutos.

**Figura 19**

Concentraciones (%) foliares de calcio (Ca) en función de tiempo transcurrido, después del día pico de la floración



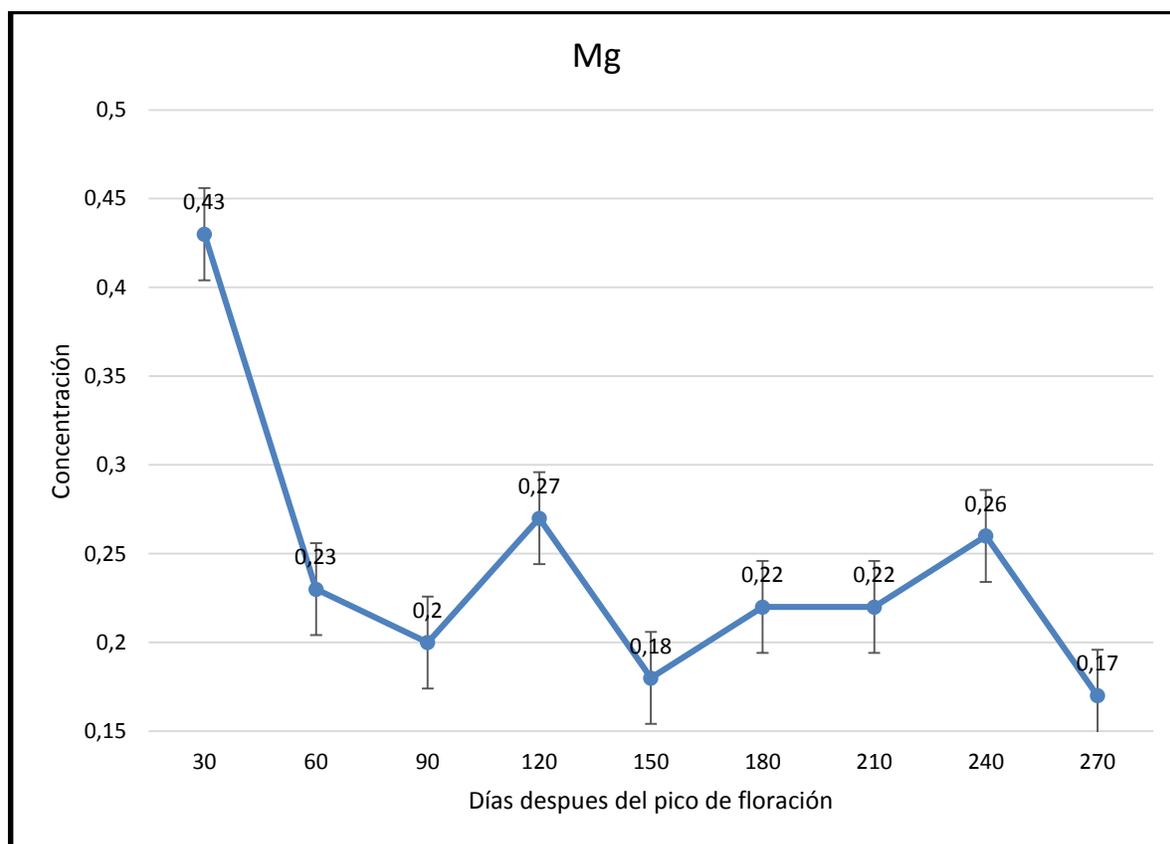
**Magnesio**

Por último, en la Figura 20 se presentan las concentraciones (%) foliares de magnesio (Mg) en función de tiempo transcurrido, después del día pico de la floración.

Para el caso de la Figura 20, se presenta en el Mg, que se mantuvieron buenas concentraciones foliares solo los 30 ddf y posterior a su avance en el tiempo fueron normales y que para los 150 ddf y 270 ddf fueron deficientes, de acuerdo con Toro et. al, (2017). En relación con el comportamiento de las concentraciones de los frutos y variación estacional de la cantidad extraída del nutrimento, Figura 15, no presenta una disminución de la concentración foliar entre los 30 ddf a 60 ddf, de esta forma no coincide en la etapa de mayor extracción de los frutos, a excepción de los 150 ddf donde se coincide con un momento de una alta extracción por parte de los frutos.

**Figura 20**

Concentraciones (%) foliares de magnesio (Mg) en función de tiempo transcurrido, después del día pico de la floración



En el caso del comportamiento y análisis de la traslocación de los elementos, pocos estudios han demostrado relaciones claras entre la concentración de los nutrientes en la fuente-hoja y el vertedero-fruto. Algunos ejemplos de esto son los reportes de Chaves y

Sarruge (1984) y Sadeghian *et. al*, (2012) para potasio, cuya respuesta se relacionó con la alta demanda de este elemento y su gran facilidad para moverse vía floema según Molina y Meléndez (2002). En divergencia con lo expuesto, los resultados por Chaves y Sarruge (1984) para Ca y Mg y por Sadeghian *et. al*, (2013) para N y P por Rojas y Avellán Gámez (2015) para Ca, Mg, no revelan la removilización de estos desde las hojas muestreadas.

En relación con el consumo de nutrimentos y el comportamiento del cultivar IAC Obatá 1669-20 en San Marcos de Tarrazú, Costa Rica se lleva a cabo la comparación entre la Tabla 4 y la Tabla 9.

A partir de lo anterior, se determina que la concentración del N para los frutos hasta los 90 ddf fue menor que la concentración a nivel foliar en un 32 % (ver Anexo 3), sin embargo, a partir de 120 ddf hasta los 270 ddf se mantienen niveles superiores a las concentraciones a nivel foliar que las de los frutos, después de este momento la concentración a nivel foliar Tabla 10 es mayor que en los frutos Tabla 4, en promedio un 30-32 %, (dato obtenido en base al cálculo anterior, para cada fecha del ddf y su cálculo promedio). Para este estudio y para el cultivar IAC Obatá 1669-20 se presentan diferencias con lo encontrado por Sadeghian *et. al*, (2013) en la variedad Castillo.

Para el caso del K, se presenta un comportamiento similar del N entre los 150 ddf y 210 ddf donde se presenta los momentos de menores concentraciones foliares coincidiendo con los momentos de mayor extracción de los frutos para estos nutrimentos. De esta forma, para este estudio y para el cultivar IAC Obatá 1669-20 se presentan coincidencias con lo encontrado por Sadeghian *et. al*, (2012) en la variedad Castillo.

Con respecto a los nutrimentos Mg y P, a partir de los 90 ddf, las concentraciones de Mg son mayores en el tejido foliar que en el fruto. A los 30, 60 y 180 ddf, las concentraciones de P en el fruto fueron mayores que en el tejido foliar, en los otros periodos, la concentración foliar fue mayor que en el fruto, excepto a los 270 ddf, donde las concentraciones fueron iguales, prácticamente alrededor de todo el ciclo y, para el caso del Ca, las concentraciones de los nutrimentos a nivel foliar durante todo el ciclo, en comparación con los frutos, son mayores entre un 30 % - 35 %. Asimismo, para este estudio y para el cultivar IAC Obatá 1669-20 se presentan diferencias con lo encontrado por Ramírez *et. al*, (2002) en la variedad Caturra.

## **Conclusiones y recomendaciones**

### **Conclusiones**

La cantidad de nutrimentos extraídos por los frutos maduros en una fanega, en este estudio fueron 1.29 kg de N, 0.08 kg de P, 1.46 kg de K, 0.13 kg de Ca y 0.09 kg de Mg.

Las variaciones de peso en los frutos determinaron 3 etapas, una de crecimiento lento, que va desde la floración hasta los 60 días, otra de rápido crecimiento hasta los 180 días y, finalmente, una de estabilización, hasta llegar a la madurez completa a los 270 días.

Se estableció que para los nutrimentos N, K y Ca, el momento de mayor extracción a lo largo del ciclo de maduración es a los 210 ddf con excepción del P y Mg que su momento de mayor extracción es entre los primeros 30 y 60 ddf.

La acumulación relativa durante los primeros 90 ddf representó un poco más del 30% para N, P y K, más del 45% para Ca y 50 % para Mg y que a partir de los 90 ddf y hasta los 180 días, en promedio, en el fruto se acumuló entre el 60 % y 70 % de estos elementos, con excepción del Ca, que fue menor.

El cultivar IAC Obatá 1669-20 presenta el siguiente orden en la acumulación de los elementos en los frutos de café:  $K > N > Ca > Mg > P$ .

Se encontró una relación clara entre las variaciones del K y N con las concentraciones de los nutrimentos foliares y su demanda por los frutos.

### **Recomendaciones**

Para el uso y programa de fertilización del cultivo de café se demuestra que el K y N son los nutrimentos con más extracción. Por lo tanto, se deben utilizar fertilizantes que contengan prioritariamente estos dos elementos.

Se recomienda aplicar los fertilizantes antes de los 180 ddf, antes de que comiencen las épocas de mayor extracción por parte de los frutos. Esto para que los nutrimentos puedan translocarse y se encuentren de forma disponible para la planta de forma oportuna.

Realizar el trabajo de investigación en otras condiciones y lugares para determinar el intervalo de variación, de esta forma se podrá comparar los resultados obtenidos bajo las circunstancias de ubicación de este estudio, cultivar y época.

Hacer un análisis de la producción promedio por hectárea para establecer las curvas de extracción y la comparación de resultados con otros cultivares.

Se recomienda estimar una mayor cantidad de plantas, frutos de café y peso de muestra fresca en la metodología de muestreo para un mejor análisis de las variables.

## Referencias bibliográficas

- Alvarado, M. y Rojas, G (2011). *Cultivo y beneficiado del café*. Tercera reimpresión de la primera edición. Euned.
- Anthony, F.; Topart, P.; Astorga, C.; Anzueto, F. y Bertrand, B (2003). La Resistencia Genética de *Coffea* spp. a *Meloidogyne paranaensis*: identificación y utilización para la caficultura latinoamericana. *Manejo Integrado de Plagas y Agroecología*, 67(1):5-12.
- Arcila P. (2015). Crecimiento y desarrollo de la planta de café. Sistemas de producción de café en Colombia. Chinchiná, Cenicafe - FNC. p. 21-60
- Arcila, J. (2004). *Anormalidades en la floración del cafeto*. Avances Técnicos Cenicafe.
- Arcila, J. (2007). *Sistemas de producción de café en Colombia*. Chinchiná. Capítulo 2. Crecimiento y desarrollo de la planta de café.
- Artavia Carmona, R. (2018). *Evaluación de la tolerancia de cinco líneas de café derivadas del Sarchimor T5296 contra el nematodo agallador Meloidogyne exigua (Göeldi 1887) en etapa de almácigo, en San Isidro de Alajuela*. Universidad Nacional. [https://repositorio.una.ac.cr/bitstream/handle/11056/14863/TFG\\_Roy%20Ademar%20Artavia%20Carmona.pdf?isAllowed=y&sequence=1](https://repositorio.una.ac.cr/bitstream/handle/11056/14863/TFG_Roy%20Ademar%20Artavia%20Carmona.pdf?isAllowed=y&sequence=1)
- Baligar, V. y Fageria, N. (2007). *Nutrient use efficiency in acid soil: Nutrient management and plant use efficiency*. In: A.C. Moniz et. al, editors, *Plant-Soil interactions at low ph*. Brazilian Soil Science Society, Viçosa, BRA.
- Bataglia, O. C., Santos, W. R. y Ferreira, M. (2004). Diagnose nutricional do cafeeiro pelo DRIS variando-se a constante de sensibilidade dos nutrientes de acordo com a intensidade e frecuencia de desposta na produção. *Bragantia*, 63: 253-263.
- Bedoya Cardoso, M., & Salazar Moreno, R. (2014). Optimización del uso de fertilizantes para el cultivo de café. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 5(SPE8), 1433-1439.

- Bertsch, F. (2003). *Absorción de nutrimentos por los cultivos*. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo.
- Bertsch, F. (2005). Estudios de absorción de nutrientes como apoyo a las recomendaciones de fertilización. *Informaciones agronómicas*, 57: 1-10.
- Bertsch, F. (2009). *Absorción de nutrimentos por los cultivos*. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo.
- Carvajal, J.F. (1984). *Cafeto: Cultivo y Fertilización*. 2da Edición. Instituto Internacional de la Potasa. Quito, Ecuador. 254 p.
- Castro Sánchez, P. (2017). *Determinación de las curvas de crecimiento y acumulación de nutrientes en la variedad Albion de fresa (Fragaria x ananassa) para establecer los requerimientos nutricionales de las plantaciones desarrolladas en la zona de Fraijanes, Cantón Central de Alajuela*. Universidad de Costa Rica. <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/4326/1/41647.pdf>.
- Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafe). (2018). *Guía Más Agronomía, Más Productividad en el Cultivo de Café*. 1.ª ed.
- Chaves, J. C. D. (2002). *Manejo do solo. Adubação e calagem, antes e após a implantação da lavoura cafeeira*. Londrina, Instituto Agrônômico do Paraná. Circular n.º 120, 36.
- Chaves, J. C. D. y Sarruge, J. R. (1984). Alterações nas concentrações de macronutrientes frutos y folhas do cafeeiro durante um ciclo produtivo. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira (Brasil)* 19(4):427-432.
- Chávez, V. (2016). *Respuesta productiva a la aplicación de urea con y sin inhibidor de la ureasa*. Presentación Icafe. [http://www.icafe.cr/simposios-nacionales-de-caficultura/?Drawer=Simposios\\*V.%20Simposio%20-%202016\\*Presentaciones%20Viernes%2022%20de%20abril%202016](http://www.icafe.cr/simposios-nacionales-de-caficultura/?Drawer=Simposios*V.%20Simposio%20-%202016*Presentaciones%20Viernes%2022%20de%20abril%202016)
- Dávila, K. (2012). Nutrición del café. Unión de Productores Agropecuarios de Nicaragua (Upanic): *La revista agropecuaria* 20: 19-21.

- De León, H. (2008). *Como se cultiva el café*. es.slideshare.net/furioso/como-se-cultiva-el-café-presentación.
- Diaz-Romeu, R. y Hunter, A. (1978). *Metodología de suelos, análisis químico de suelos y tejido vegetal e investigación en invernadero*.
- European Coffee Federation (ECF). (2016). *Historia del café*. <https://www.ecf-coffee.org/>
- Fernández, M (2012). *Deficiencias nutricionales del cafeto* - Uprn. <http://academic.uprm.edu/mmonroig/id25.htm>.
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2010). *Fertilizantes y su uso*.
- García, C. (2007). *Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos*.
- Google Earth. (2020). *Mapa de ubicación de parcela*. Costa Rica en Google Earth. <https://earth.google.com/web/@9.65604876,-84.02734559,1372.31354344a,978.38126082d,35y,0h,0t,0r>
- Havlin, J.; Beaton, J.; Tisdale, S. y Nelson, W. (1999). *Soil Fertility and fertilizers; an introduction to nutrient management*. 6.<sup>a</sup> ed. Upper Saddle River, Prentice Hall.
- Herber, L. y Kraemer, A (2010). *Curvas de absorción de nutrientes para cinco variedades de arroz de uso actual en Argentina*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Instituto del café de Costa Rica (Icafe), Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica (MAG) y Servicio Fitosanitario del Estado de Costa Rica (SFE). (2013). *Proyecto para la atención de emergencia fitosanitaria por epifitía de la roya del cafeto*. Plan de acción. Parte 1. Control químico.
- Instituto del café de Costa Rica (Icafe). (2011). *Guía técnica para el cultivo de café*. 1.<sup>a</sup> ed. Icafe-CIcafe.
- Instituto del café de Costa Rica (Icafe). (2012). *Informe sobre la actividad cafetalera de Costa Rica*. No XLI.

- Instituto del café de Costa Rica (Icafe). (2013). *Café de Costa Rica: el espíritu de una nación*. Editorial Río Nevado, S. A.
- Instituto del café de Costa Rica (Icafe). (2018a). *Informe de la actividad cafetalera de Costa Rica. Costa Rica*. Instituto del Café de Costa Rica. <http://www.icafe.cr/sector-cafetalero/informacion-de-mercado/informes-de-la-actividad-cafetalera/>.
- Instituto del café de Costa Rica (Icafe). (2018b). *Costos de producción agrícola de café en fruta cosecha 2017 2018. Costa Rica*. Unidad de estudios económicos y mercado del Icafe. <http://www.icafe.cr/sector-cafetalero/informacion-de-mercado/costo-de-la-actividad-cafetalera/>.
- Instituto del café de Costa Rica (Icafe). (2019). *Sector cafetalero: Clima del café*. Instituto del café de Costa Rica. [www.icafe.cr](http://www.icafe.cr).
- Instituto del café de Costa Rica (Icafe). (2020). *Guía técnica para el cultivo de café*. 2.<sup>a</sup> ed. Icafe-CIcafe.
- Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). (2015). *Censo agropecuario*.
- International Plant Nutrition Institute. (2009). Memorias del Simposio Uso Eficiente de nutrientes presentado por el IPNI en el XVIII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. San José, Costa Rica. 16 al 20 de noviembre.
- Khalajabadi, S. S. (2017). Manejo integrado de nutrientes para una caficultura sostenible. *Suelos Ecuatoriales*, 44(2), 74-89.
- Laviola, B. G.; Martínez, H. E. P.; Souza, R. B. DE; Bartolomeu, R. y Álvarez, V. H. (2007b). Dinámica de calcio e magnesio em folhas e frutos de Coffea arabica. *Revista brasileira de ciência do solo*, 31(2):319-329.
- Laviola, B.; Martínez, H.; Salomão, I.; Cruz, C. y Mendonça, S. (2007a). Acúmulo de nutrientes em fruto de cafeeiro em em quatro altitudes de cultivo: cálcio, magnésio e enxofre. *Revista brasileira de ciência do solo*, 31:1451-1462.
- Laviola, B.; Martínez, H.; Salomão, I.; Cruz, C. y Mendonça, S. y Rosado, L. (2008).

- Acúmulo em frutos e variação na concentração foliar de NPK em cafeeiro cultivado em quatro altitudes. *Biosci. J.; Uberlândia*, 24(1): 19-31.
- Lima Filho O. y Malavolta, E. (2003). Studies on mineral Nutrition of the Coffee plant (Coffea arabica l. Cv. Catuaí vermelho). Lxiv. Remobilization and re-utilization of nitrogen and potassium by normal and deficient plants. *Braz. J. Biol.*, 63(3): 481-490.
- Mccauley, A.; Jones, C. y Jacobsen, J. (2011). Plant nutrient functions and deficiency and toxicity symptoms. *Nutrient Management Module*, 9: 1-16.
- Mengel, K. y Kirkby, E. (2000). *Principios de nutrición vegetal*. Traducción al español de la 4.<sup>a</sup> ed (1987). Internacional Potash Institute. Basel, Switzerland.
- Molina, E. y Meléndez, G. (2002). *Nutrición mineral de las plantas*. Centro de Investigaciones Agronómicas. UCR. <http://www.cia.ucr.ac.cr/pdf/Memorias/Memoria%20Curso%20Fertilizaci%C3%B3n%20Foliar.pdf>.
- Mora, N. (2008). *Agrocadena de café*. Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica (MAG). [mag.go.cr/bibliotecavirtual/e70-9314.pdf](http://mag.go.cr/bibliotecavirtual/e70-9314.pdf)
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). (2000). *Estrategias en materia de fertilizantes*. <http://docplayer.es/8744798-Estrategias-en-materia-de-fertilizantes.html>
- Parra, H. (2018). Correlaciones entre los contenidos de nitrógeno y fósforo del suelo y la composición del tejido vegetal en café y pasto. *Cenicafé (Colombia)* v. 22 (1) p. 18-26.
- Pezzopane, J.; Júnior, M.; Thomaziello, R. y Camargo, M. (2003). Metodología e Técnica Experimentais. *Escala para Avaliação de Estádios Fenológicos do Cafeeiro Arábica*. *Bragantia, Campinas*, 62(3): 499-505.
- Promix. (2015). *Centro de formación. Rol del potasio en el cultivo*. <http://www.pthorticulture.com/es/centro-de-formacion/rol-del-potasio-en-el->

## Cultivo-de-plantas/

- Ramírez, F. (1999). El café en Costa Rica: gran modelador del costarricense. Editorial UCR.
- Ramírez, F.; Bertsch, F. y Mora, L. (2002). Consumo de nutrimentos por los frutos y bandolas de café Caturra durante un ciclo de desarrollo y maduración en Aquiares, Turrialba, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 26(1):33-42.
- Riaño, H.; Arcila, P.; Jaramillo, R. y Chaves, C. (2004). *Acumulación de materia seca y extracción de nutrimentos por Coffea arabica, L. Cv.* Colombia en tres localidades de la zona cafetera central. *CenIcafe (Colombia)* 55(4):265-276.
- Rojas Rojas, M. J. y Avellán Gámez, T. (2015). Crecimiento y curvas de acumulación de nutrientes en frutos de café (*Coffea arábica, L.*) cultivar Catrenic con riego complementario, San Marcos, Carazo Nicaragua, 2013. <https://repositorio.una.edu.ni/3140/6/tnf61r741.pdf>
- Sadeghian, K. (2008). *Fertilidad del suelo y nutrición del café en Colombia*. Guía práctica. Boletín Técnico n.º 32. Chinchina: CenIcafe.
- Sadeghian, K. S.; Mejía, M. B. y González, O. H. (2012). Acumulación de nitrógeno fósforo y potasio en los frutos de café. *CenIcafe*, 63(1):7-18.
- Sadeghian, K. S.; Mejía, M. B. y González, O. H. (2013). *Acumulación de calcio magnesio y azufre en los frutos de café*. Manizales, Cenicafe (Avances Técnicos n.º 430).
- Sadeghian, K.; Mejía, M. y Arcila, P. (2006). Composición elemental de frutos de café y extracción de nutrientes por la cosecha en la zona cafetera de Colombia. *Cenicafe (Colombia)* 57(4):251-261.
- Salazar, G.; Chaves, C.; Riaño, H.; Arcila, P. y Jaramillo, R. (1994). Crecimiento del fruto de café *Coffea arábica* var. *Caturra*. *CenIcafe (Colombia)* 45(2):41-50.
- Sancho, V. (1999). Curvas de absorción de nutrientes: importancia y uso en los programas de fertilización. *Informes agronómicos*. 36: 11-13.

- Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria (Sepsa). (2018). *Boletín Estadístico Agropecuario* №28.
- Segura, A. (1992). *Estudio del crecimiento del fruto de café. In: Informe anual de labores 1991 1992*. Convenio Icafe-MAG.
- Shirin, K.; Naseem, S.; Bashir, E.; Imad, S. y Shafio, S. (2008). A comparison of digestion methods for the estimation of elements in *Dodonaea Viscosa*: a native flora of Wadh, Balochistan, Pakistan. *J. Chem. Soc. Pak.*, 30(1): 90-95.
- Solórzano Rincón, N. K. (2019). *Nutrición Mineral en el Cultivo de Café*. Villa Corzo, Chiapas. Pag 8
- Souza, V.; Maestri, M.; Braga, J. y Chaves, J. (1975). Variações no teor de alguns elementos minerais nas folhas e frutos de café *Coffea arabica*, L. Var. Mundo Novo. *Revista Ceres*, 22(123):318-331.
- Supracafé S. A. (2010). *Información nutricional*. <http://www.supracafe.com/es/menu/coffee-culture/información-nutricional>
- Toro, H., Suárez Vásquez, S., Guerrero Riascos, R., & Zapata, H. (2017). Evaluación de la disponibilidad del magnesio en dos suelos de la zona cafetera mediante índices relacionados con los factores cantidad e intensidad. *Suelos Ecuatoriales (Colombia)* v. 25 p. 47-50 ISSN 0562- 5351.
- Tucker, C. (2017). *Coffee Culture*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315678795>
- Tuesta, C. y Méndez, F. (2012). *Información básica sobre fertilizantes*. <http://www.es.scribd.com/doc/206500490/informacion-basica-sobre-fertilizantes>
- Valarini, V.; Bataglia, O. y Fazuoli, L. (2005). Macronutrientes em folhas e frutos de cultivares de café arábica de porte baixo. *Bragantia, Campinas*, 64(4): 661-672.
- Valencia, G. (1998). *Manual de nutrición y fertilización del café*. Inpofos.
- World Coffee Research. (2016). *Coffee Varieties of Mesoamerica and the Caribbean*. United

States, 2019. <https://worldcoffeeresearch.org/>.

Yaselga, V. (2013). Estudio de factibilidad para la creación de una microempresa productora y comercializadora de café de frejol canario-injerto mejorado con cobertura en el cantón Bolívar provincia del Carchi. Universidad Técnica del Norte. <http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/2950/1/02%20ICA%20691%20TESIS.pdf>

## Anexos

### Anexo 1. Caracterización fenológica

Descripción de las plantas de café variedad Caturra, durante un ciclo de crecimiento y maduración de los frutos en Aquiares, Turrialba, Costa Rica– Floria Bertsch.

**Tabla 11**

*Estado fenológico de una planta en general*

| Selección  |   | Promedio     | M  |
|------------|---|--------------|----|
| Plantas    | #ejes orto trópicos (e. o)                    | 2,55 ± 0.22  | 20 |
|            | Altura inicial de e. o oct-19                 | 1,56 ± 0'06  | 20 |
|            | Altura final de e. o                          | 1.87 ± 0,07  | 20 |
|            | #Bandolas 10 cm/c.o                           | 33,85 ± 2.95 | 20 |
|            | #Bandolas efectivas (>50 % floreado) /e. o    | 24,05 ± 2,54 | 20 |
| +65Bandola | Largo promedio (cm)                           | 66,9 ± 1.6   | 98 |
|            | Largo inicial de bandola febrero 98 (cm)      | 59,45 ± 3,52 | 20 |
|            | Largo final de bandola noviembre 98 (cm)      | 69,30 ± 5.09 | 20 |
|            | #nudos  | 63.2 ± 4.5   | 98 |
|            | nudos /cm                                     | 0.94 ± 0.06  | 98 |
|            | Peso fresco (g)                               | 62,9 ± 5.5   | 98 |
|            | Peso seco (g)                                 | 21.7 ± 1.9   | 98 |
|            | % de humedad de bandola                       | 65 % ± 1 %   | 98 |
| Floración  | Nudos floreados                               | 32.9 ± 8,6   | 9  |
|            | % nudos floreados                             | 59 % ±10 %   | 9  |
|            | #Botones florales grandes /5 g de peso fresco | 82.7 ±4,8    | 6  |
|            | Peso fresco de flores /bandola (g)            | 10.3 ±5.4    | 16 |
|            | Peso seco de flores /bandola (g)              | 1,6 ±1.0     | 14 |
|            | % de Humedad de flores                        | 83 % ± 1 %   | 14 |

*Nota.* m número de plantas y bandolas Ramírez *et. al*, (2002).

**Tabla 12**

*Resultado de análisis de suelo*

**Resultados:**

| Unidad    | cmol/L  |        |          | mg/L    |       |      |           |  |
|-----------|---------|--------|----------|---------|-------|------|-----------|--|
| Elemento  | Potasio | Calcio | Magnesio | Fosforo | Cobre | Zinc | Manganeso |  |
| Resultado | 1,71    | 17,18  | 4,87     | 35,00   | 10,00 | 0,90 | 12,00     |  |
| Condición | Alto    | Alto   | Alto     | Alto    | Medio | Bajo | Medio     |  |

| Unidad    | pH         | cmol/L |       |       | %    | cmol/L |       |       |         |
|-----------|------------|--------|-------|-------|------|--------|-------|-------|---------|
| Variable  |            | Acidez | Bases | CICE  | SA   | Ca/Mg  | Ca/K  | Mg/K  | Ca+Mg/K |
| Resultado | 5,37       | 0,20   | 23,76 | 23,96 | 0,83 | 3,53   | 10,05 | 2,85  | 12,89   |
| Condición | Medio-Bajo | Bajo   | Medio | Medio | Bajo | Medio  | Medio | Medio | Medio   |

**Anexo 2. Imágenes de estructuras vegetales reproductivas y registro de información**

**Figura 21**

Homogenización de la floración



**Figura 22**

Selección de plantas y bandolas



**Figura 23**

Peso de fruto maduros en un litro



**Figura 24**

Peso de frutos mensuales



**Figura 25**

Planta de café en su maduración final



**Anexo 3. Cálculo de obtención de porcentaje de variación entre concentraciones**

concentración foliar = 2.67.....100%

concentración frutos = 1.82.....X

$$x = 68.16\%$$

$$100\% - 68\% = 32\%$$

