

## AUTORRADIOGRAFIA POR CAPTURA NEUTRONICA (NCR) UTILIZANDO LA REACCION NUCLEAR $B^{10}(n, \alpha)Li^7$

Luis Guillermo Loría\*  
Ricardo Jiménez Dam\*

**E**l boro es un elemento básico en el desarrollo, floración y fructificación de las plantas. La deficiencia de este elemento causa la muerte del ápice de crecimiento, las flores no llegan a desarrollarse, el crecimiento de las raíces se vuelve lento y los órganos de reserva presentan desintegración de tejidos.

En este trabajo se presenta la variación de la concentración de boro natural en función del grosor de la pulpa, en el fruto de mango. La concentración del boro natural decrece exponencialmente desde la piel (83,9 ppm) al interior de la fruta (2,4 ppm, a 5,6 mm de profundidad).

Colocando gotas de una solución de ( $B^{10}$ )  $H_3BO_3$  en la superficie del fruto, se mide el coeficiente de difusión de este elemento, el cual tiene un valor aparente de  $1,6 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ .

Los resultados se obtienen irradiando con neutrones térmicos, secciones histológicas de mango, depositadas sobre detectores de estado sólido del tipo CR-39 [Allyl diglicol carbonato], utilizando la reacción nuclear  $B^{10}(n, \alpha)Li^7$ , provenientes del reactor nuclear de la Universidad de Estrasburgo, Francia.

**B**oron is a basic element in the development, flowering, and fruiting of the plants. Deficiency of this element causes the growth center to die, the flowers do not develop, the roots develop slowly and the back-up organs demonstrate a desintegration of tissues.

The method of neutron capture radiography was used to study the distribution of boron in mango fruit. There was a regular

decrease of the concentration of natural boron from the skin (83,9 ppm) to the interior of the fruit (2,4 ppm, 5,6 mm deep in the fruit).

When drops of a solution of ( $^{10}\text{B}$ )  $H_3BO_3$  were placed on the fruit surface, boron accumulated in restricted zones, within the fruit skin, wich apparently correspond to skin secretory-glands. The apparent coefficient of diffusion of boric acid from these zones of high boron accumulation to the interior of the fruit was of the order of  $1,6 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ .

### INTRODUCCION

El boro es un elemento requerido por las plantas en pequeñas cantidades<sup>1</sup>. De igual forma, un pequeño exceso puede ser tóxico para las especies.

El boro participa en el transporte de glúcidos, y el ión borato se acompleja fácilmente con los compuestos polihidroxi, tales como los azúcares, jugando un papel muy importante en la diferenciación y desarrollo de las células, en el metabolismo del nitrógeno, fósforo, lípidos y hormonas, en la absorción de sales, así como también en la fotosíntesis y en la síntesis de purinas, pirimidinas y por ende en la formación de ácidos nucleicos y citoquininas. Es particularmente esencial en el funcionamiento de los meristemas, y se requiere en grandes cantidades para la elongación del tubo polínico<sup>2,3,4,5,6,8,10,11</sup>.

\* Sección Física Nuclear. Escuela de Física. Universidad de Costa Rica.

Los síntomas de deficiencia de este elemento en las plantas se observan en la muerte del ápice de crecimiento<sup>5</sup>, las hojas presentan textura gruesa y se vuelven frágiles<sup>9</sup>, mientras que la flor no llega a desarrollarse y el crecimiento de la raíz se vuelve lento. Los órganos carnosos o de reserva presentan desintegración de tejidos que conducen a anomalías tales como podredumbres de la médula y formación de tejidos suberizados<sup>5</sup>.

El B<sup>10</sup> se utiliza como trazador del boro natural al ser irradiado con neutrones térmicos<sup>12,14</sup> bajo la reacción nuclear B<sup>10</sup>(n, α) Li<sup>7</sup>. La concentración de boro en muestras biológicas es evaluada mediante la técnica de autorradiografía por captura neutrónica NCR en detectores de estado sólido<sup>7</sup> del tipo CR-39.

Bajo la misma metodología se determina el coeficiente de difusión del boro desde la piel al interior de la fruta de mango, utilizando microgotas de ácido bórico enriquecido al 90% en B<sup>10</sup>, depositadas sobre la piel del mango.

## MATERIALES Y METODOS

### I Boro natural

El boro no se encuentra libre en la naturaleza. Aparece bajo la forma de ácido ortobórico, con dos isótopos estables, B<sup>10</sup> y B<sup>11</sup> cuyas abundancias isotópicas son respectivamente del 19,9 y 80,1%.

El B<sup>10</sup> es susceptible a la reacción nuclear B<sup>10</sup>(n, α) Li<sup>7</sup> al ser irradiado con neutrones térmicos, originando dos partículas alfa y sus respectivos núcleos de retroceso [Li<sup>7</sup>] como se describe en el Cuadro 1.

Por lo expuesto anteriormente y por su alta sección eficaz [3885 barns] es usado como un trazador del boro natural<sup>7</sup>. La reacción nuclear mencionada permite obtener una imagen del contenido de boro de una muestra biológica colocada sobre un detector CR-39, a causa del daño que produce cualquiera de las cuatro partículas que llegan a él<sup>14</sup>.

### II Preparación de muestras

Sobre la cáscara de mangos adultos, se depositaron microgotas con un volumen de 5 microlitros de una solución de ácido bórico 0,1 M enriquecido en B<sup>10</sup> al 90%, siendo su contenido de 5 x 10<sup>-5</sup> moles. Después de 24 horas las microgotas fueron removidas utilizando agua bidestilada con el propósito de eliminar el boro que no penetró en la fruta.

Fragmentos del fruto que contenían cáscara sobre la cual se depositó la solución, de 0,5 cm<sup>2</sup> de superficie y 0,5 cm de profundidad, se congelaron dentro de un pequeño recipiente de aluminio conteniendo isopenteno, para luego seccionarlos a un grosor de 10 micrones. Las secciones de mango se depositaron sobre los detectores del tipo CR-39 y fueron liofilizados por un período de 24 horas.

El mismo procedimiento se siguió para fragmentos de la fruta, situados lejos del sitio en el cual se colocó la solución del boro enriquecido, con el fin de conocer la distribución de boro natural en las muestras de fruta de mango. Las secciones de mango se irradiaron en una fluencia de neutrones térmicos de 10<sup>16</sup> n m<sup>-2</sup>.

CUADRO 1. Características de la reacción nuclear.

R. nuclear	Sección eficaz	Partículas emitidas		
		Tipo	Proporción	Energía
<sup>10</sup> B (n, α) Li <sup>7</sup>	3885 Barns	α	6%	1,78 Mev
		<sup>7</sup> Li	6%	1,01 Mev
		α	94%	1,47 Mev
		<sup>7</sup> Li	94%	0,84 Mev



Finalizada la irradiación los detectores se revelaron en una solución de NaOH (5M), durante 120 minutos a una temperatura de 75°C. El objetivo de este tratamiento es hacer visibles al microscopio óptico los trazos latentes dejados sobre el detector por las partículas provenientes de la reacción nuclear.

### III Evaluación de la concentración

Sean  $N$  y  $\sigma_N$  el número de trazos y el error estándar por unidad de área de visión del microscopio en un sitio de la muestra lejos de la gota siendo  $N_0$  y  $\sigma_0$  los correspondientes valores del número de trazos de fondo y su respectivo error estándar, medido en 100 áreas fuera de la región de irradiación de las muestras. Entonces el número de trazos provenientes del boro natural se puede escribir por la relación:

$$\begin{aligned} n &= N - N_0 & 1 \\ \text{con } \sigma_n^2 &= \sigma_N^2 + \sigma_0^2 & 2 \end{aligned}$$

La relación entre la concentración local de boro en una muestra y la correspondiente densidad de trazos en el detector, está dada por la relación:

$$C = K n \quad 3$$

donde

- C: concentración de boro en mol kg<sup>-1</sup> en material fresco
- n: densidad de trazos por campo en tracks m<sup>-2</sup>
- k: constante a determinar

El valor de la constante de proporcionalidad entre la concentración local del boro y el número de trazos está dada por la relación<sup>9</sup>:

$$K = 2 \{ \sigma \tau N_A \phi d p \sum_j \pi_j [ I(e, \Delta_j) ] [ 1 - [ I(e, \Delta_j) / 2 \Delta_j ] ] \}^{-1} \quad 4$$

con

$$\Delta_j = (L_{0j} d_0 / f d) (\bar{A} / A_0)^{1/2} \quad 5$$

donde:

- $\sigma$ : Sección eficaz para la reacción nuclear  $B^{10} (n, \alpha) Li^7$ , la cual tiene un valor de  $3,885 \times 10^{-28} \text{ m}^2$
- $\tau$ : Abundancia isotópica del  $B^{10}$ , la cual tiene un valor de 0,199 para el boro natural y 0,9 para el boro enriquecido
- $N_A$ : Número de avogadro ( $6,022 \times 10^{23}$ )
- $\phi$ : Fluencia neutrónica ( $10^{16} \text{ n m}^{-2}$  en este caso)
- $d_0$ : Densidad del material de referencia ( $3,83 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$ )
- $d$ : Densidad de la muestra ( $1,014 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$ )
- $p$ : Factor de calibración<sup>12</sup> (0,69)
- $\Pi_j$ : Proporción de reacciones nucleares que producen la partícula  $j$  ( $\alpha$  o  $Li^7$ )
- $e$ : Grosor de la muestra ( $10^{-5} \text{ mm}$  en nuestro caso)
- $I(e, \Delta_j)$ : el menor de los dos números  $e$  o  $\frac{A_j}{\Delta_j}$
- $A_j$ : Máxima distancia que puede recorrer la partícula en el material y todavía con energía suficiente para producir un trazo en el detector
- $f$ : Razón de masa seca a fresca de la muestra (0,30)
- $A$ : Masa atómica media de la muestra seca (6,14 en nuestro caso)
- $A_0$ : Masa atómica media del material de referencia (50 en este caso)

Siendo el error estándar en la concentración C:

$$\sigma_c = (C/n) \sigma_n = K \sigma_n \quad 6$$

En general se prefiere expresar la concentración del boro en ppm (ppm = partes por millón = mg/kg), entonces ella puede ser expresada por la ecuación:

$$\gamma = 10^3 (A_B / f) C \quad 7$$

Sustituyendo la ecuación (3) en la ecuación (7), se obtiene:

$$\gamma = 10^3 (K A_B / f) n \quad 8$$

quedando el error estándar de la concentración expresado por:

$$\sigma_{\gamma} = 10^3 (K A_B / f) \sigma_n \quad 9$$

El número total de trazos  $N$ , contados a una profundidad,  $x$ , por área de campo del microscopio,  $s$ , en una muestra conteniendo parte de la gota de ácido bórico enriquecido en  $B^{10}$  al 90% representan la suma de la radiación de fondo local,  $N_o$ , del número de trazos provenientes del boro natural,  $n_{nat}$ , y de los trazos correspondientes a la difusión del  $B^{10}$  desde la zona en que se acumuló.

Entonces el número de trazos por unidad de área provenientes de la difusión, está dado por:

$$n_D = N - N_o - n_{nat} \quad 10$$

Haciendo uso de las ecuaciones (3), (4), (5) y (8) se evalúa la concentración del boro proveniente de la difusión.

La ley de difusión<sup>13</sup> desde una cantidad de sustancia con una concentración

superficial,  $M$  (moles  $m^{-2}$ ) en el tiempo  $t$ , puede escribirse utilizando la relación:

$$\gamma_D = 10^3 (A_B / d f) [M / 2 (\pi D t)^{1/2}] \exp [-(x-x_0) / 4Dt] \quad 11$$

donde:

$x_0$ : Profundidad de la zona de alta concentración de boro con respecto a la cáscara

$D$ : Coeficiente de difusión medido en  $m^2 s^{-1}$

$t$ : Tiempo transcurrido para la difusión

## RESULTADOS

- 1- La Figura 1 muestra una sección de mango liofilizada y depositada sobre un detector de estado sólido del tipo CR-39, irradiada en una fluencia de  $10^{16} n m^{-2}$ .
- 2- La Figura 2 muestra una microfotografía de la sección transversal de los



FIGURA 1.  
Sección liofilizada  
de mango.

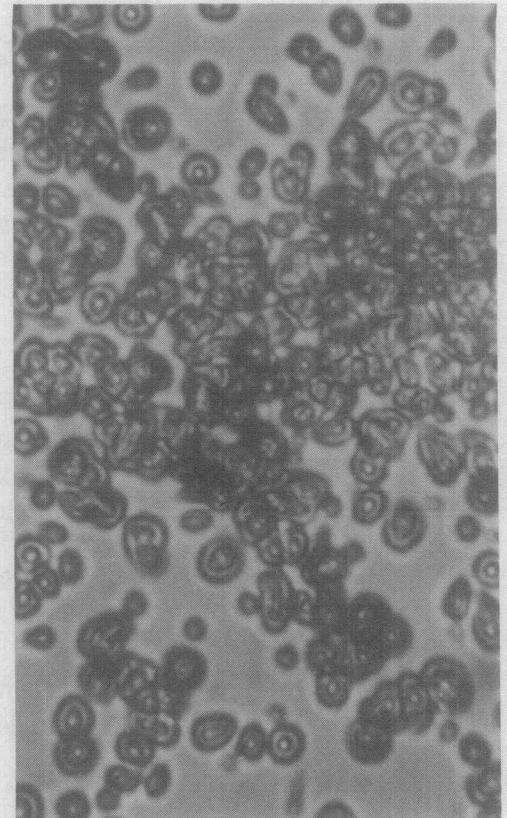
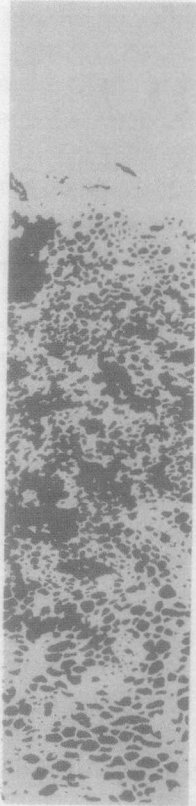


FIGURA 2. Trazos nucleares provenientes del boro de difusión.





trazos provenientes de la difusión del boro.

- 3- La radiación de fondo en los detectores, corresponde a trazos nucleares observados que no provienen de la reacción nuclear ( $n, \alpha$ ), con un valor de  $1,68 \pm 0,01$  trazos por campo.
- 4- Los neutrones rápidos procedentes del reactor inducen la reacción nuclear ( $n, p$ ) con los isótopos de oxígeno y de nitrógeno del detector<sup>12</sup>. Esta partícula, por su alta energía, produce un trazo en un plano por debajo del que contiene a los de las partículas alfa, cuando el detector se revela bajo las condiciones preestablecidas.
- 5- La Figura 3 muestra la variación de la concentración,  $\gamma$  (ppm en material seco) del boro natural con la profundidad,  $x$ , en la fruta. La curva de mejor ajuste entre la concentración,  $\gamma$ , y la profundidad,  $x$ , corresponde a un exponencial. Simbólicamente la relación entre las variables se expresa por:

$$\gamma = \gamma_0 \exp(-\lambda x) \quad 12$$

Los valores de  $\gamma_0$  y  $\lambda$  obtenidos desde la curva de mejor ajuste son de 79,1 ppm y  $0,555 \times 10^3 \text{ m}^{-1}$ .

Aplicando el mismo método a otra sección de mango se obtuvieron, para  $\gamma_0$  y  $\lambda$ , valores de 66,1 ppm y  $0,568 \times 10^3 \text{ m}^{-1}$  respectivamente. Al agrupar todos los datos de los experimentos, en una sola gráfica que no se muestra, se obtuvo para  $\gamma_0$  y  $\lambda$  83,9 ppm y  $0,537 \text{ m}^{-1}$  respectivamente. A una profundidad de 5,6 mm la concentración de boro alcanza solamente 2,4 ppm.

- 6- La Figura 4 muestra la curva de mejor ajuste para la variación de la concentración del boro proveniente de la difusión en función de la profundidad en el mango.

La curva en mención tiene la forma:

$$\gamma_D = \gamma_{D_0} \exp[-b(x-x_0)] \quad 13$$

donde:

- $\gamma_{D_0}$ : Concentración máxima en ppm, para material seco  
 b: Parámetro del modelo ( $\text{m}^{-2}$ )

Haciendo uso de las ecuaciones (11) y (13) el coeficiente de difusión queda dado por:

$$D = (10^6 / 4\pi t) (A_B M / d f \gamma_{D_0}) \quad 14$$

De la misma forma, esto es, haciendo uso de las mismas ecuaciones, el coeficiente de difusión está dado por:

$$D = 1 / 4 b t \quad 15$$

Desde el ajuste de la Figura 4, se obtienen los valores de  $\gamma_{D_0}$  y  $b$ , los que son de 13,9 ppm y  $1,3 \times 10^6 \text{ m}^{-2}$  respectivamente, y que permiten evaluar el coeficiente de difusión aparente con un valor de  $2,1 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ . Ajustando todos los datos del experimento en una misma gráfica, se obtuvo un coeficiente de difusión de  $1,6 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ .

- 7- El valor del coeficiente de difusión calculado no varía mucho del encontrado por los mismos autores al estudiar la difusión del boro lateralmente en la cáscara de mango, el cual tiene un valor de  $8 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ .

## CONCLUSIONES

- 1- Este método permite cuantificar el boro natural utilizando el  $B^{10}$  como un trazador cuando es irradiado con fluencias mayores a  $10^{16} \text{ n cm}^{-2}$ , con una cantidad mínima detectable para esta fluencia de  $0,46 \pm 0,02$  ppm.
- 2- La desviación estándar de los datos correspondientes a la concentración de boro a una misma profundidad en una sección histológica de mango parece en principio ser alta, pero debe tomarse en cuenta que el boro

FIGURA 3.  
Concentración de boro natural en mango en función de la profundidad en la pulpa de mango.

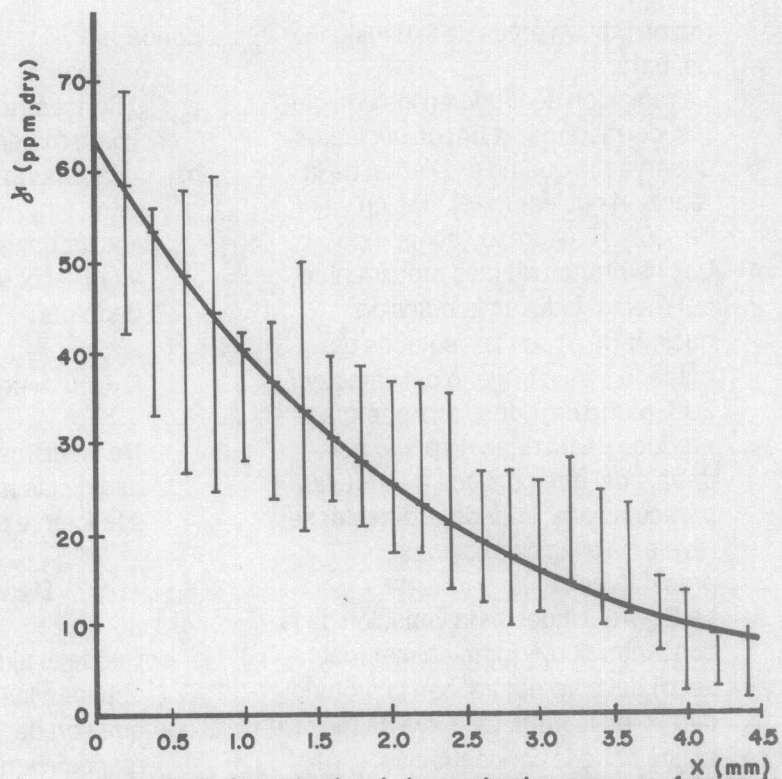


Figura No 3. Concentración de boro natural en mango en función de la profundidad en la pulpa de mango.

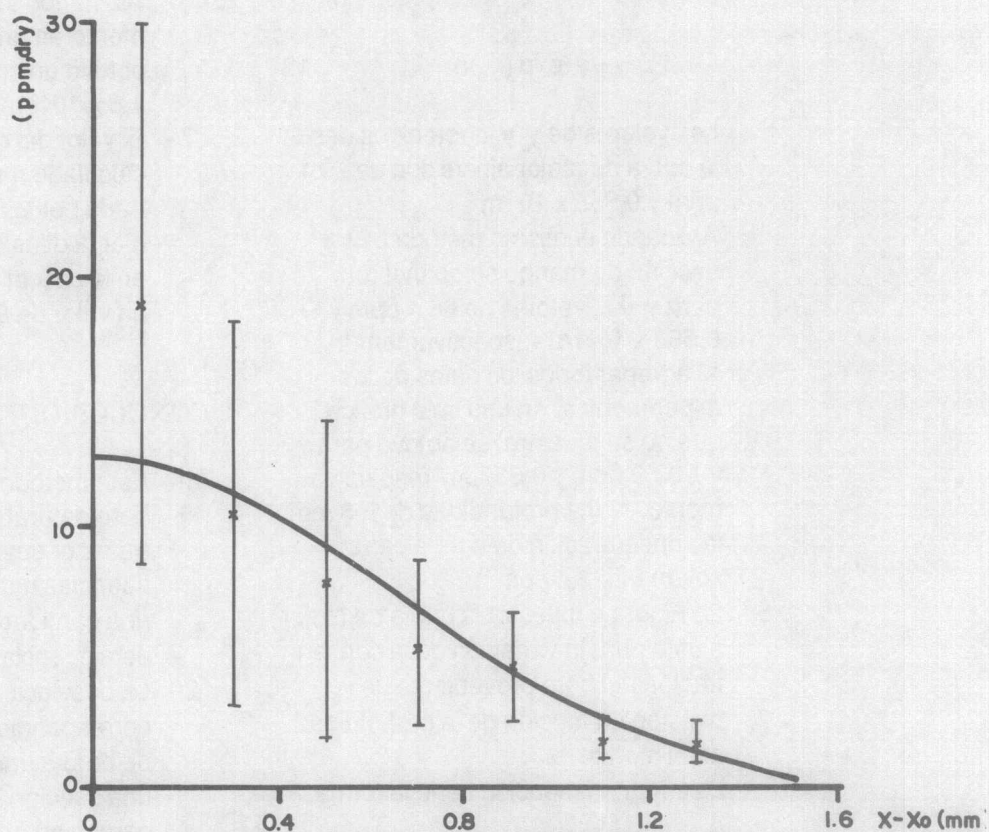
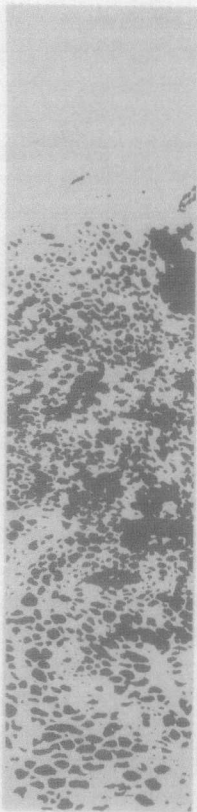


Figura 4. Concentración de boro enriquecido (90%) en función de la profundidad en pulpa de mango.

FIGURA 4.  
Concentración de boro enriquecido (90%) en función de la profundidad en pulpa de mango.





no está distribuido uniformemente y esto es lo que provoca la dispersión de los datos.

- 3- El método descrito además de cuantificar el elemento en mención, permite observar su distribución, ya que sobre el detector queda impreso el sitio del tejido donde están presentes los átomos de boro.
- 4- El modelo exponencial propuesto para la distribución del boro natural en la pulpa de mango, es solamente un modelo arbitrario al que todavía no puede dársele una interpretación biológica, pero el hecho de conocer los parámetros  $\gamma$  y  $\lambda$ , permitirá en un futuro compararlos con los resultados de otros experimentos en la misma fruta.  
También será interesante en un futuro conocer la variación de la concentración del elemento estudiado, pero cerca de la semilla, con el fin de conocer si el elemento continúa decreciendo conforme se avanza hacia ella, de acuerdo con la ley exponencial propuesta.
- 5- El conocimiento del coeficiente de difusión permitirá, en un futuro, corregir deficiencias del elemento en los frutos mediante aplicaciones foliares con sustancias que contengan al elemento.
- 6- La autorradiografía por captura neutrónica ha demostrado una vez más que es el método mejor adaptado al estudio del status del boro en plantas, dado que otras técnicas analíticas nucleares solo cuantifican la concentración total y no permiten el estudio de las variaciones de concentración, en un mismo fruto.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores queremos dejar patente nuestro agradecimiento a la Vicerrectoría

de Investigación de la Universidad de Costa Rica, al Organismo Internacional de Energía Atómica y al Laboratorio de Intercambios Celulares de la Universidad de Rouen, Francia, en la persona del Dr. Michell Thellier, miembro de la Academia de Ciencias, por el soporte brindado.

#### LITERATURA CITADA

- 1- Thellier, M. *Repartition, absorption et migration de bore. Radioisotopes in Soil Plant Nutrition Studies*. IAEA. Vienna. 1962.
- 2- Gauch, H. *The role of boron in the translocation of sucrose. Plant Physiology*. Academic Press, 28:457. U.S.A., 1975.
- 3- Jackson, J. *The role of boron in plants. In Trace elements in soil-plants-animal systems*. Eds. Academic Press, 28:450 U.S.A., 1975.
- 4- Loneragan, J. *The availability and absorption of trace elements in soil plants system and their relations to movement and concentration of trace elements in plants*. Eds. Academic press, 28:480. U.S.A., 1975.
- 5- Nason, A. *Models of action of the essential mineral elements. Plant Physiology*. Eds. Academic Press 3:451. U.S.A., 1976.
- 6- Price, C. *Functions of micronutrients in Plants. In Micronutrients in Agriculture*. Mortvendt J. Eds., Soil Sciences Society of America. U.S.A., 1972.
- 7- Thellier, M. *Quantitative estimation in neutron capture radiography. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. B. 30, p. 567-579. North Holland. 1988.
- 8- Jiménez, R.; Loría, L. *Detection and imaging of boron plant tissues for agronomical purposes in Costa Rica. Physiologie Vegetale*. T. 306, Serie III, p. 583-590. 1988.

- 9- Thellier, M. Comunicación privada. 1991.
- 10- Mengel, K. **Principles of Plant Nutrition.** Intern. Potash Inst., Berne 1978.
- 11- Guimaraes, P. **Nutrição e adubação de mangueira.** Informe Agropecuario. Brasil. 1982.
- 12- Thellier, M. *Estimation of local concentration from the measurement of local track-densities by microneutrography.* **Biological and Medical Applications of Nuclear Analytical methods.** Studsvik Energiteknik AB, Nikoping, Sweden, 1987.
- 13- Crank, J. **The Mathematics of diffusion,** Clarendon Press, oxford, 1967.
- 14- Duval, Y. *Detection of Stable Isotopes with A (n,  $\alpha$ ) nuclear reaction: Application to the Measurement of Unidirectional Fluxes of Borate in plants.* **Journal of Radioanalytical Chemistry,** Vol. 55, No. 2, p. 297-306, France. 1980.



Revista semestral, Dpto. Diseño Industrial. Apdo 159-7050 Cartago. Costa Rica.