

CENTRO AGRONOMICO TROPICAL DE INVESTIGACION Y ENSEÑANZA

SUBDIRECCION GENERAL ADJUNTA DE ENSEÑANZA

MODELO DE PATRONES DE SOMBRA DE SURCOS DE ERYTHRINA  
POEPPIGIANA (WALPERS) O.F. COOK EN SISTEMAS DE CULTIVO EN  
CALLEJONES

Tesis sometida a la consideración del Comité Técnico Académico del Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, para optar el grado de

MAGISTER SCIENTIAE

Por:

PEKKA NYGREN

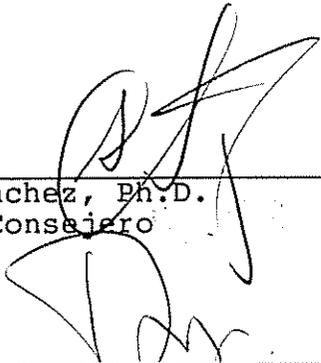
Turrialba, Costa Rica

1990

Esta tesis ha sido aceptada, en su presente forma, por la Coordinación del Programa de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales del CATIE, y aprobada por el Comité Asesor de estudiante como requisito parcial para optar el grado de

**MAGISTER SCIENTIAE**

COMITE ASESOR:

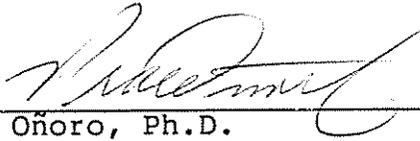


---

Germán Sánchez, Ph.D.  
Profesor Consejero

---

Florent Maraux, Ing. Agr.  
Miembro del Comité



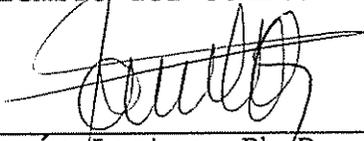
---

Pedro Oñoro, Ph.D.  
Miembro del Comité



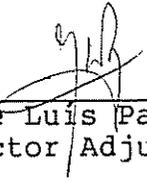
---

José Arze, M.Sc.  
Miembro del Comité



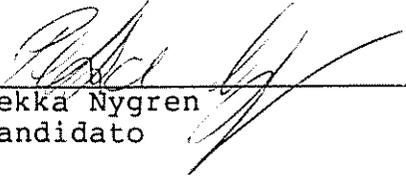
---

Ramón Lastra, Ph.D.  
Coordinador, Programa de Estudios de Posgrado



---

Dr. José Luis Parisí  
Subdirector Adjunto de Enseñanza



---

Pekka Nygren  
Candidato

"Y esas cuatro capas (sobre la tierra), Sibú las dejó por lo menos para que protegiera lo que es el calor, para que el ditséwo o el Bribri que somos nosotros no suframos las consecuencias de un calor; porque si el sol estuviera directo, quemaría como fuego o más que el fuego, no existiría ningún ser humano, ni las plantas, ni nada..."

Albir Morales de Amubri en

González Chaves A. & González Vásquez, F.: La casa cósmica talamanqueña y sus simbolismos. EUNED, 1989.

**AGRADECIMIENTOS**

A Germán Sánchez, profesor consejero, por su permanente colaboración y apoyo para este trabajo

A Florent Maraux, Pedro Oñoro y José Arze, los miembros del comité asesor, por sus consejos y apoyo científico en el trabajo experimental y desarrollo del modelo

A Rodrigo Navarro por su fiel y cuidadoso asistencia en el trabajo experimental

A Juan Hidalgo y Ramón Álvarez, los afables operadores del Centro de Cómputo, por mantener la paciencia y el buen humor (el suyo y el mío) durante las largas horas de desarrollo y comprobación del modelo

A mi amigo Tapani Lahti, de la Universidad de Helsinki, por permitir el uso de su programa Helios2 como guía en parte del trabajo de programación

A Margarita Contreras por la revisión de la ortografía y gramática de este documento

A mis compañeros estudiantes, Juan Carlos Chacón, Emilio Pérez y Jorge Jiménez, por permitir el uso de una parte de sus datos y por discusiones importantes

A Mario Jiménez, Patricia Leandro y Gustavo Ortiz por realizar el análisis del suelo

A la Academia de Finlandia por financiar mis estudios de maestría en el CATIE

## INDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	IV
INDICE GENERAL	V
LISTA DE CUADROS	VII
LISTA DE FIGURAS	IX
RESUMEN	XII
SUMMARY	XIII
TIIVISTELMÄ	XIV
GLOSARIO DE LOS TERMINOS RADIOMETRICOS	XV
LISTA DE SIMBOLOS PRINCIPALES	XVI
1. INTRODUCCION	1.
2. REVISION DE LITERATURA	6.
2.1. Comportamiento de <u>Erythrina poeppigiana</u> en cultivo en callejones	6.
2.2. Régimen de radiación solar en cultivo en callejones	12.
2.3. Modelaje de la intercepción de la radiación solar por las plantas	18.
2.4. Enfoques de modelaje de los patrones de sombra de árboles	24.
3. MARCO TEORICO	31.
4. MATERIALES Y METODOS	43.
4.1. Diseño experimental y manejo del cultivo	43.
4.2. Mediciones del crecimiento y productividad de frijol y <u>Erythrina poeppigiana</u>	47.
4.3. Mediciones de la radiación solar	50.
4.4. Mediciones del suelo	56.
5. RESULTADOS DEL TRABAJO EXPERIMENTAL	58.
5.1. Análisis del suelo y tejido vegetal de <u>Erythrina poeppigiana</u>	58.
5.2. Productividad del sistema	61.
5.3. Prueba de metodología de las mediciones de la transmitancia de la copa	67.
5.4. Características de la sombra de <u>Erythrina poeppigiana</u>	69.
5.4.1. Dimensiones de los árboles	69.
5.4.2. Transmitancia de la copa	72.
5.4.3. Frecuencia de manchas solares ("sun-	

flecks")	78.
5.5. Mediciones de la radiación solar incidente	82.
6. PROGRAMA DE SIMULACION	85.
6.1. Introducción al programa	85.
6.2. Supuestos del programa	86.
6.3. Algoritmo de cómputo	89.
6.4. Cálculo de la posición del sol	93.
6.5. Estimación de la irradiancia y densidad de flujo fotosintético de fotones (PPFD) incidente sobre árboles	96.
6.6. Estimación de la PPFD incidente sobre el cultivo (PPFD <sub>i</sub> )	97.
6.6.1. Geometría de los árboles	97.
6.6.2. Transmisión de la PPFD en la copa	107.
7. COMPROBACION Y APLICACION DEL MODELO	108.
7.1. Ajuste de las simulaciones a las condiciones climáticas locales	108.
7.2. Comparación entre la exposición fotosintética de fotones sobre cultivo (PPE <sub>i</sub> ) simulada y medida	110.
7.3. Una aplicación del modelo: efecto de la orientación del callejón sobre la PPE <sub>i</sub>	113.
8. DISCUSION	119.
8.1. Representatividad de los resultados experimentales	119.
8.2. Características de la sombra de <u>Erythrina poeppigiana</u>	122.
8.3. Mediciones de la radiación solar	127.
8.4. Aplicabilidad del modelo en investigación agroforestal	129.
9. CONCLUSIONES	134.
BIBLIOGRAFIA	136.
APENDICES:	
1. Guía del usuario del programa Sibú	
2. Listado del programa Sibú	
3. Listado del programa SIBU EXEC	

## LISTA DE CUADROS

- Cuadro 1. Rendimiento del maíz por cosecha en cultivo en callejones con Erythrina poeppigiana y otras especies de árboles. 9.
- Cuadro 2. Las mediciones de la densidad de flujo fotosintético de fotones sobre el cultivo ( $PPFD_i$ ) usadas en la comprobación del modelo. 55.
- Cuadro 3. Métodos utilizados para la determinación de la acidez y concentraciones de materia orgánica y nutrimentos en muestras de suelo y tejido vegetal. 57.
- Cuadro 4. Medias por bloque y profundidad del contenido de materia orgánica y nutrimentos en las muestras del suelo. 59.
- Cuadro 5. Las medias por bloque del contenido de nutrimentos en las muestras de la biomasa de Erythrina poeppigiana. 59.
- Cuadro 6. Análisis de varianza del rendimiento del frijol. 62.
- Cuadro 7. Análisis de varianza de la biomasa foliar de Erythrina poeppigiana. 66.
- Cuadro 8. Los valores del parámetro K con intervalo de confianza de 95% en función del tiempo desde la poda. 73.
- Cuadro 9. Los valores del parámetro k con intervalo de confianza de 95% en función del tiempo desde la poda. 74.
- Cuadro 10. Análisis de sensibilidad del valor de k: la  $PPFD_i$  en función de la profundidad de la copa con valor mediano de  $k \pm$  intervalo de confianza de 95%. 78.
- Cuadro 11. Los valores del parámetro T con intervalo de confianza de 95% en función del tiempo desde la poda. 79.

**Cuadro 12.** Análisis de sensibilidad del valor de  $\Gamma$ : la SF en función de la profundidad de la copa con valor mediano de  $\Gamma$   $\pm$  intervalo de confianza de 95%.

81.

**Cuadro 13.** El valor del factor de conversión entre  $Rg_0$  y  $PPFD_0$ ,  $\epsilon$ , en función de la época y elevación solar  $\phi$ .

84.

**Cuadro 14.** La diferencia porcentual entre la exposición fotosintética de fotones sobre el cultivo ( $PPE_i$ ) simulada y ajustada con la ecuación (55) y la medida, medias por orientación de los surcos de árboles y posición del sensor.

111.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Esquema de los principales factores para tomar en cuenta en el modelaje de patrones de sombra de árboles en sistemas agroforestales. 32.
- Figura 2. Arreglo espacial del experimento "Orientación de Callejones". 44.
- Figura 3. Arreglo espacial de una parcela en el experimento "Orientación de Callejones". 45.
- Figura 4. Posición de los sensores lineares de quantum en una parcela experimental. 55.
- Figura 5. El comportamiento de la humedad gravimétrica del suelo en función del tiempo desde la siembra durante el cultivo de frijol. 60.
- Figura 6. Rendimiento del frijol por parcela. 62.
- Figura 7. Medias por orientación del rendimiento de frijol por filas. 63.
- Figura 8. Biomasa foliar de Erythrina poeppigiana por parcela. 66.
- Figura 9. Coeficiente de variación de diez mediciones de PFD en función de la profundidad de copa 68.
- Figura 10. Desarrollo de la altura de Erythrina poeppigiana en función del tiempo desde la poda. 70.
- Figura 11. Desarrollo del diámetro de la copa de E. poeppigiana en función del tiempo desde la poda. 70.
- Figura 12. Desarrollo del área foliar total y densidad de área foliar de Erythrina poeppigiana en función del tiempo desde la poda. 71.

Figura 13. Valores de  $k$  estimados con la ecuación (22) en función del tiempo desde la poda.

75.

Figura 14. PPF<sub>D</sub> en función de la profundidad de copa con  $k$  mediano  $\pm$  intervalo de confianza de 95%.

77.

Figura 15. PPF<sub>D</sub> en función de la profundidad de copa con  $k$  mínimo y máximo.

77.

Figura 16. Los valores de  $F$  estimados con la ecuación (25) en función del tiempo desde la poda.

79.

Figura 17. Frecuencia de manchas solares en función de la profundidad de copa con  $F$  mínimo, mediano y máximo.

81.

Figura 18. Radiación directa y radiación global en función de la elevación solar con  $\tau = 0.748$ .

82.

Figura 19. PPF<sub>D</sub> en función de la radiación global entre el 1 y 10 de abril de 1990 en el área experimental. Las observaciones son medias de diez minutos.

83.

Figura 20. El algoritmo de cómputo del programa Sibú.

90.

Figura 21. Ubicación del plano solar, plano de corte y plano de sombra.

98.

Figura 22. Izquierda: ubicación de los puntos para determinar si el eje solar atraviesa la copa. Derecha: determinación de la sección máxima de la copa y la intersección entre el plano solar y la copa.

101.

Figura 23. Los puntos cardinales usados para la determinación de la distancia atravesada por el flujo directo de fotones en la elipse  $C$  y semielipse  $C'$ .

104.

Figura 24. Comparación entre la exposición fotosintética de fotones diaria medida y simulada incidente sobre cultivo.

112.

Figura 25. Curva de crecimiento del frijol, en función del tiempo desde la poda de los árboles, usada en las simulaciones del efecto de la orientación de los callejones.  
114.

Figura 26. El porcentaje de la  $PPE_i$  de  $PPE_0$  en las diferentes épocas fenológicas del frijol  
115.

Figura 27. El porcentaje de la  $PPE_i$  de la  $PPE_0$  durante la época de barbecho.  
117.

## RESUMEN

NYGREN, P. 1990. Modelo de patrones de sombra de surcos de Erythrina poeppigiana (Walpers) O.F. Cook en sistemas de cultivo en callejones. Tesis Mag. Sc., Turrialba, C.R., CATIE. 142 p. + 3 apendices.

**Palabras claves:** Competencia por la radiación solar, modelos de simulación, diseño de sistemas agroforestales, transmitancia de la copa, geometría de árboles, orientación de callejones

Uno de los mayores dificultades en el desarrollo de sistemas de cultivo en callejones es el tamaño y costo elevado de los experimentos que cubran un rango adecuado de arreglos de los árboles y cultivos. Una solución a este problema es usar modelos de simulación para explorar un gran número de diseños y comprobar solo los mejores en el campo.

El objetivo de la presente tesis fue desarrollar un modelo de simulación de los patrones de sombra de surcos de Erythrina poeppigiana (Walpers) O.F. Cook en sistemas de cultivo en callejones para poder explorar diseños del sistema con esta especie.

El trabajo experimental se concentró en determinar la transmisión del flujo de fotones en la copa de E. poeppigiana. Esta se puede describir con una ecuación modificada de la ley de Beer:

$$PPFD_i = PPFD_0 \cdot e^{-ks}$$

donde  $PPFD_0$  es la densidad de flujo fotosintético de fotones sobre la copa,  $s$  longitud de la trayectoria del flujo de fotones que atraviesa por la copa,  $PPFD_i$  la PPFD en sombra de la copa y  $k$  es un parámetro que incluye las características ópticas de la copa. El valor del parámetro  $k$  tenía variación cíclica durante el ciclo de poda de 24 semanas, siendo mayor en 4 semanas después de la poda y menor en 17 semanas, cuando los árboles tenían una caída marcada de hojas. La variación del valor de  $k$  entre 1.45 y 2.35 indica que la sombra de E. poeppigiana es densa.

Basado en el trabajo de campo y en el análisis geométrico de la sombra de los árboles se desarrolló un modelo de simulación que permite estimar la integral de la PPFD sobre un tiempo definido por el usuario en un campo con la sombra de árboles cuando se conoce la ubicación de los árboles, sus dimensiones, la altura del cultivo, la latitud geográfica y la transmitancia atmosférica. El campo se divide en cuadrículas de 50 x 50 cm y la simulación se realiza para cada una de estas.

La aplicación principal del modelo es explorar teóricamente el efecto del componente árbol sobre el régimen de radiación solar sobre el cultivo, no solo en sistemas de cultivo en callejones sino también en otros sistemas agroforestales con E. poeppigiana.

## SUMMARY

NYGREN, P. 1990. A model of the shading pattern of the Erythrina poeppigiana (Walpers) O.F. Cook rows in alley cropping systems. M.Sc. thesis, Turrialba, C.R., CATIE. 142 p + 3 appendices.

**Key words:** Competence for solar radiation, simulation models, design of agroforestry systems, crown transmittance, tree geometry, alley orientation

One of the main difficulties in the development of alley cropping systems is the size and high cost of experiments which cover an adequate range of arrangements of trees and crops. One solution to this problem is to use simulation models to explore a wide range of designs and test only the best in the field.

The aim of the present thesis was to develop a simulation model for the shading pattern of the Erythrina poeppigiana (Walpers) O.F. Cook rows in alley cropping systems to explore designs of the systems with the species.

The experimental work concentrated on the determination of the transmission of the photon flux in the crown of E. poeppigiana. This can be described with a modified Beer's law equation:

$$PPFD_i = PPFD_0 \cdot e^{-ks}$$

where  $PPFD_0$  is the photosynthetic photon flux density above the trees,  $s$  is the path length of the photon flux inside the crown,  $PPFD_i$  is the PPFD in the shade of the crown and  $k$  is a parameter which includes the optical characteristics of the crown. The value of parameter  $k$  showed a cyclic variation during the pruning cycle of 24 weeks. The maximum value was observed at 4 weeks after the pruning, and the minimum at 17 weeks, when the trees had a major leaf fall. The variation of the  $k$  value was between 1.45 and 2.35 which indicates that the shadow of E. poeppigiana is dense.

Based on the experimental work and geometrical analysis of the tree shadows a simulation model was developed. The model enables to estimate the integral of PPFD over time defined by the user in a field with trees once the location and dimensions of the trees, the crop height, geographical latitude and atmospheric transmittance are known. The field is divided into 50 x 50 cm squares and simulation is realized independently for all of them.

The main application of the model is to explore theoretically the effect of the tree component on the radiation regime above the crop, not only in alley cropping systems, but also in other agroforestry systems with E. poeppigiana.

## TIIVISTELMÄ

NYGREN, P. 1990. Erythrina poeppigiana (Walpers) O.F. Cook -rivien aiheuttaman varjon malli käytäväviljelyssä. Tesis Mag.Sc., Turrialba, C.R., CATIE. 142 s. + 3 liitettä.

Avainsanat: Valokilpailu, simulointimallit, peltometsäjärjestelmien suunnittelu, latvuksen transmittanssi, puiden geometria, käytävien suunta

Yksi käytäväviljelyjärjestelmien kehittämisen pääongelmista on kyllin monia käsittelyvaihtoehtoja sisältävien kenttäkokeiden suuri koko ja kalleus. Yksi mahdollinen ratkaisu ongelmaan on käyttää simulointimalleja alustavassa suunnittelussa ja kokeilla vain lupaavimmat vaihtoehdot kentällä.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli kehittää Erythrina poeppigiana (Walpers) O.F. Cook -rivien aiheuttaman varjon malli käytäväviljelyssä koejärjestelyjen alustavaa testausta varten.

Kokeellinen työ keskittyi määrittämään fotonivuon transmision E. poeppigianan latvuksessa. Tämä voidaan kuvata muokatulla Beerin lain yhtälöllä:

$$PPFD_i = PPFD_0 \cdot e^{-ks}$$

jossa  $PPFD_0$  on fotosynteettisen fotonivuon tiheys latvuksen yläpuolella,  $s$  fotonivuon latvuksessa kulkema matka,  $PPFD_i$  on  $PPFD$  latvuksen varjossa ja  $k$  on parametri, johon sisältyvät latvuksen optiset ominaisuudet. Parametri  $k$ :n arvossa havaittiin syklistä vaihtelua 24 viikon latvomiskierron aikana. Arvo oli suurin 4 viikkoa latvomisen jälkeen ja pienimmillään viikolla 17, jolloin puut pudottivat runsaasti lehtiä. Parametri  $k$ :n arvo vaihteli välillä 1.45 ja 2.35, mikä osoittaa, että E. poeppigianan varjo on tiheä.

Kenttätyön ja puiden varjon geometrisen analyysin pohjalta kehitettiin simulointimalli, jonka avulla on mahdollista arvioida  $PPFD$ :n integraali käyttäjän haluaman ajan yli, kun tunnetaan puiden sijainti pellolla, niiden dimensiot, viljelykasvin pituus, leveysaste ja ilmakehän transmittanssi. Pelto jaetaan 50 x 50 cm:n ruutuihin ja simulointi tehdään jokaiselle erikseen.

Mallin tärkein käyttökohde on arvioida teoreettisesti puukomponentin vaikutusta viljelykasvin säteily-ympäristöön, paitsi käytäväviljelyssä myös muissa peltometsäjärjestelmissä, joissa käytetään Erythrina poeppigiana.

## GLOSARIO DE LOS TERMINOS RADIOMETRICOS

- Densidad de flujo fotosintético de fotones:** (photosynthetic photo flux density, PPF) número de quanta de luz, fotones, de la banda de longitud de onda de 400 a 700 nanómetros de la radiación solar incidente sobre unidad de superficie por unidad de tiempo. La unidad generalmente usada es micromoles por metro cuadrado por segundo ( $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ).
- Exposición fotosintética de fotones:** (photosynthetic photon exposure, PPE) integral de la PPF sobre tiempo; número de fotones recibidos por unidad de superficie. La unidad generalmente usada es moles por metro cuadrado ( $\text{molm}^{-2}$ ).
- Irradiancia:** (irradiance) flujo radiante en forma de onda electromagnética proveniente de todas las direcciones incidente sobre unidad de superficie. La unidad en sistema SI es watts por metro cuadrado ( $\text{Wm}^{-2}$ ). En el estudio de la radiación solar la irradiancia se refiere generalmente a toda la radiación emitida por el sol; longitud de onda 280 - 4000 nanómetros.
- Irradiancia fotosintética:** (photosynthetic irradiance) irradiancia en la longitud de onda de 400 a 700 nanómetros. La unidad es  $\text{Wm}^{-2}$ .
- Mancha solar:** (sunfleck) área dentro o bajo de una cobertura vegetal expuesta a la radiación solar directa penetrada de las aberturas de la cobertura. NOTA: a diferencia de los otros términos, este término es válido solamente en esta tesis, y no debe ser confundido con el término astronómico mancha solar.
- Radiación activa para fotosíntesis:** (photosynthetically active radiation) radiación en la banda de longitud de onda de 400 a 700 nanómetros. El término cubre tanto el flujo radiante electromagnética como el flujo de fotones.
- Radiación solar difusa:** (diffuse solar radiation, o sky radiation) la fracción de la radiación solar que se dispersa en todas las direcciones al chocar con el agua aerosoles de la atmósfera y entra a la superficie de la tierra de todo el hemisferio celeste. La unidad es  $\text{Wm}^{-2}$ .
- Radiación solar directa:** (direct solar radiation) radiación solar transmitida directamente por la atmósfera al superficie de la tierra. La unidad es  $\text{Wm}^{-2}$ .
- Radiación solar global:** (global solar radiation) suma de la radiación solar directa y difusa recibido sobre la superficie de la tierra. La Unidad es  $\text{Wm}^{-2}$ .

## LISTA DE SIMBOLOS PRINCIPALES

Simbolo	Descripción
$D_j$	Día juliano (número del día en el año)
$\alpha$	Medida de ángulo para calcular declinación solar
$\delta$	Declinación solar
$A_h$	Angulo horario del sol medido desde el Sur
$\phi$	Angulo de elevación solar medido desde horizonte
$\theta$	Angulo de acimut solar medido desde el Norte
$l$	Latitud geográfica
$m$	Número de masas atmosféricas
$\tau$	Transmitancia de la atmósfera para la radiación directa
$\tau_d$	Transmitancia de la atmósfera para la radiación difusa
$R_{00}$	Constante solar
$R_b$	Radiación solar directa
$R_d$	Radiación solar difusa
$R_g$	Radiación solar global (irradiancia)
RAF	Radiación activa para fotosíntesis
IF	Irradiancia fotosintética
PPFD	Densidad de flujo fotosintético de fotones
PPFD <sub>b</sub>	Densidad de flujo directo fotosintético de fotones
PPFD <sub>d</sub>	Densidad de flujo difusa fotosintético de fotones
PPFD <sub>i</sub> '	Densidad de flujo fotosintético de fotones ajustada sobre el callejón
PPE	Exposición fotosintética de fotones

Simbolo	Descripción
$\epsilon$	Factor de conversión entre $R_g$ y PPF $D$
$\epsilon_b$	Factor de conversión entre $R_b$ y PPF $D_b$
$\epsilon_d$	Factor de conversión entre $R_d$ y PPF $D_d$
$F$	Densidad de área foliar
$s$	Longitud de la trayectoria que atraviesa el flujo de fotones dentro de la copa del árbol
$K$	Parámetro de transmitancia en la Ley de Beer
$k$	Coefficiente de transmisión
$SF$	Frecuencia relativa de manchas solares (sunflecks)
$\Gamma$	Factor de reducción de la frecuencia de manchas solares
$a$	Semieje horizontal de elipsoide
$b$	Semieje vertical de elipsoide
$h$	Altura del tronco limpio sobre plano de sombra

**NOTA:** Con cualquier de los simbolos presentados, el subíndice 0 refiere a "incidente sobre los árboles" y el subíndice i refiere a "incidente sobre el cultivo".