



Universidad Nacional del Litoral

Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas

DESARROLLO DE SISTEMA DE DETECCIÓN DE CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DE PLANTAS MEDIANTE PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

Autores: Haimovich, David
Rychter, Damian

Director: Bioing. Martínez, Cesar

Co-director: Ing. Agrónomo Acosta, Juan

Santa Fe - 2010

sinc(r) Research Institute for Signals, Systems and Computational Intelligence (fich.unl.edu.ar/sinc)
D. Háimovich, D. Rychter, C. E. Martínez & J. Acosta: "Desarrollo de sistema de detección de características morfológicas de plantas mediante procesamiento digital de imágenes (Undergraduate project)"
Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas - Universidad Nacional del Litoral, 2010.

Agradecimientos

Este trabajo final no podría haberse realizado sin el apoyo de un gran número de personas a las que queremos agradecer:

Bioing. Cesar Martínez, quien nos propuso el tema en cuestión y nos guió a lo largo de todo el camino.

Ing. Juan Manuel Acosta, quien nos brindó todo su tiempo, conocimiento y realizó las capturas de todas las fotos utilizadas para la experimentación.

Ing. Gastón Martín, por habernos incentivados y orientados en la elección del tema y habernos dedicado su tiempo en cada uno de los puntos de entrega.

A todos los profesores y ayudantes de cátedra que fueron parte de nuestra formación a lo largo de estos años, tanto a nivel académico como personal.

A todos nuestros compañeros, que nos dieron su amistad y sustento

Y por último a nuestra familia y amigos que nos bancaron y lo seguirán haciendo.

Resumen

Las técnicas utilizadas en la actualidad para la detección de características morfológicas, se basan principalmente en técnicas manuales, las cuales conllevan mucho tiempo y son propicias a errores.

El objetivo de este trabajo final es desarrollar un sistema que permita mejorar el proceso de recolección de datos característicos de las plantas mediante técnicas de procesamiento digital de imágenes. Para ello, se ha especificado un protocolo para la toma de imágenes de la planta *Iresine diffusa* Humb. Bonpl. Ex Willd, bajo condiciones controladas, utilizando luz fluorescente artificial, ubicando la planta en una maceta negra y capturando imágenes desde dos ángulos perpendiculares.

Se han desarrollado varios algoritmos que permiten realizar la detección de diversas características de la planta. Dentro de las características se pueden mencionar la distancia entre nodos, el ancho y largo de las hojas, los ángulos de las hojas, el ancho del tallo, y el ápice de la planta.

Por último se implementa un sistema de persistencia para los datos obtenidos como así también una interfaz gráfica que permite tanto la visualización de los resultados como la exportación de los mismos a una planilla de cálculo.

Los resultados obtenidos en la experimentación muestran un buen desempeño en la detección de las características morfológicas de la planta *I. diffusa* cuando posee hasta 3 nodos, aliviando la tarea manual del agrónomo.

sinc(r) Research Institute for Signals, Systems and Computational Intelligence (fich.unl.edu.ar/sinc)
D. Háimovich, D. Rychter, C. E. Martínez & J. Acosta: "Desarrollo de sistema de detección de características morfológicas de plantas mediante procesamiento digital de imágenes (Undergraduate project)"
Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas - Universidad Nacional del Litoral, 2010.

Prefacio

La Arquitectura Vegetal como ciencia surgió en el año 1970 basándose en estudios de los sistemas de ramificación de árboles tropicales , desarrollándose de esta manera un marco conceptual para la clasificación de las plantas. El análisis arquitectural es una herramienta que permite esclarecer las distintas adaptaciones que presentan las especies en lo que concierne a la ocupación del espacio tridimensional, intercepción de luz, y además, en el caso particular de malezas, la intercepción también de agroquímicos pulverizados [10]. En la actualidad las técnicas de detección de características morfológicas de las plantas no se realizan mediante sistemas automáticos. Estas se basan en la medición manual (utilizando reglas, transportadores y calibres) de ciertos puntos esenciales con los cuales se logra clasificar las plantas para luego generar modelos.

El procesamiento digital de imágenes es un área que evoluciona día a día en la informática. Su crecimiento ha sido impulsado por los avances tecnológicos en imagen digital y por el crecimiento de los procesadores y los dispositivos de almacenamiento masivo. Las aéreas que tradicionalmente usaron imágenes analógicas han cambiado a sistemas digitales. Ejemplos importantes son la medicina, la producción de vídeo, y los sistemas de la seguridad.

El procesamiento digital de imagen se basa principalmente en obtener información útil a partir de las imágenes. Idealmente, esto se hace por medio de una computadora, con poca o ninguna intervención humana.

En el área de la arquitectura vegetal, el procesamiento de imágenes se ha introducido lentamente en los últimos años. Mucho se ha estudiado en técnicas de clasificación de plantas y hojas, en detección de enfermedades,

y en modelado en 3D de las mismas, pero poco se ha hecho en el área de detección de características morfológicas de las plantas.

Las técnicas utilizadas en la actualidad para la detección de características morfológicas, se basan principalmente en técnicas manuales, las cuales conllevan mucho tiempo y son propicias a errores. Esta tesis no propone resolver el problema en su totalidad, sino que es un primer paso en la detección de dichas características. Se pretende determinar las ventajas y desventajas de los algoritmos de detección, como así también encontrar los puntos fuertes y débiles en la detección de cada una de las características morfológicas.

Este proyecto final se encuentra organizado en seis capítulos, como se explica a continuación.

El Capítulo 1 expone los motivos por los cuales se decide realizar el presente trabajo, se realiza un resumen sobre el estado del arte, finalmente se describen los objetivos y alcances del proyecto final. El Capítulo 2 introduce al lector en los conceptos y técnicas básicas utilizadas en el proyecto. El Capítulo 3 se centra en el análisis y diseño del sistema, para lo cual se desarrolla un protocolo para la toma de imágenes, se analizan y evalúan las tecnologías utilizadas y por último se plasman los casos de uso y los diagramas de clase basados en el lenguaje de modelado UML. El Capítulo 4 comenta los algoritmos y técnicas utilizadas para la detección de cada característica y la investigación realizada para tal fin. El Capítulo 5 presenta los resultados obtenidos en la fase de experimentación. Finalmente en el Capítulo 6 se encuentran las conclusiones de la presente investigación.

Haimovich, David. Rychter, Damian. Santa Fe, Diciembre 2010

Índice general

| | |
|--|-------------|
| Resumen | IV |
| Prefacio | VI |
| Índice de figuras | XI |
| Índice de tablas | XIII |
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Motivación | 1 |
| 1.2. Estado del arte | 4 |
| 1.3. Objetivos del Proyecto Final | 5 |
| 1.4. Alcances del Proyecto Final | 6 |
| 2. Revisión de conceptos | 7 |
| 2.1. Imagen Digital | 7 |
| 2.2. Umbralización de histograma | 8 |
| 2.3. Modelos de Color | 8 |
| 2.4. Transformaciones morfológicas | 10 |
| 2.5. Transformada de Hough | 11 |
| 2.6. Detección de bordes | 12 |

| | |
|---|-----------|
| 2.7. Correspondencia con máscaras | 13 |
| 3. Análisis y Diseño del Sistema | 15 |
| 3.1. Protocolo para la captura de imágenes | 15 |
| 3.2. Análisis de las tecnologías utilizadas | 17 |
| 3.3. Casos de uso | 20 |
| 3.4. Diagrama de clases | 22 |
| 4. Implementación del sistema | 27 |
| 4.1. Introducción | 27 |
| 4.2. Datos de prueba | 28 |
| 4.3. Preprocesamiento | 28 |
| 4.4. Detección de características | 31 |
| 4.5. Segmentación por patrones de color | 32 |
| 4.6. Segmentación mediante correlación | 33 |
| 4.6.1. Aplicación del algoritmo de Hough | 36 |
| 4.6.2. Detección de intersecciones de rectas | 38 |
| 4.7. Detección de largo y ancho de hoja | 39 |
| 5. Experimentación y resultados | 42 |
| 5.1. Detección del origen | 42 |
| 5.2. Detección del tallo y los nodos | 43 |
| 5.3. Detección de largo y ancho de hojas | 48 |
| 5.4. Exportación y persistencia de resultados | 52 |
| 6. Conclusiones y desarrollos futuros | 53 |
| 6.1. Conclusiones finales | 53 |
| 6.2. Desarrollos futuros | 54 |
| Bibliografía | 56 |
| A. Tecnologías utilizadas | 58 |
| A.1. Hibernate: | 58 |
| A.2. JExcel: | 59 |

| | |
|----------------------------------|----|
| A.3. JAI: | 59 |
| A.4. Base Datos MySql: | 59 |
| A.5. JDK: | 60 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| 1.1. I. Diffusa | 2 |
| 2.1. Modelo RGB | 9 |
| 2.2. Modelo HSV | 10 |
| 2.3. Transformación de Hough | 12 |
| 2.4. (a)Imagen original en plano XY ; (b)Imagen en plano $\rho\theta$; (c) Imagen reconstruida en el plano XY | 12 |
| 2.5. Correspondencia con máscaras | 14 |
| 3.1. Imágenes capturadas mediante protocolo: (a)Planta posiciona- da en 3; (b)Planta posicionada en 6. | 17 |
| 3.2. Diagrama de clase paquete Persistencia | 22 |
| 3.3. Diagrama de clase paquete Servicio | 23 |
| 3.4. Diagrama de clase paquete Modelo | 24 |
| 3.5. Diagrama de clase paquete Util | 25 |
| 3.6. Diagrama de clase paquete Visualización | 26 |
| 4.1. Diagrama de bloques | 28 |
| 4.2. (a)Planta; (b)Imagen Exceso de Rojo normalizada en $[0,255]$ y unmbrazada en 100; c)Imagen Exceso de Verde normalizada en $[0,255]$ y unmbrazada en 100 | 29 |

4.3. (R)Componente Roja; (G)Componente Verde; (B)Componente Azul; (H)Componente Matiz; (S)Componente Saturación; (I)Componente Intensidad. 30

4.4. (a)Planta; (b)Planta segmentada HSV con arena 31

4.5. Características a detectar: A)Nodo; B)Ápice; C)Origen; D)Nodo; E)Nodo; F)Origen 32

4.6. (a)Imagen de la planta; (b)Imagen de la planta segmentada en el rango [200,255] de la capa Saturación y en el rango [0,25] para la capa de Matiz. 33

4.7. (a)Imagen de la planta; (b)Imagen del tallo segmentado. 35

4.8. Plantillas para la detección de ramas 36

4.9. (a)Imagen en el espacio x, y ; (b)Imagen transformada al espacio ρ, θ segmentada mediante un umbral previamente definido. 37

4.10. (a)Imagen de las ramas segmentadas por medio de correlación; (b)Líneas rectas que aproximan las ramas, obtenidas mediante la antitransformada de Hough. 39

4.11. ROI que contiene las dos hojas pertenecientes a un nodo de la planta. 40

4.12. ROI de un nodo calculado en la contra imagen. 41

5.1. Orígenes detectados satisfactoriamente 43

5.2. (a)Hoja solapando origen; (b)Tallo inclinado; (c)Elementos rojizos 43

5.3. Detección de ramas y tallo sobre 3 imágenes de plantas distintas 45

5.4. Detección de nodo 46

5.5. Detección de falsos positivos 47

5.6. Error detección largo de hoja 50

5.7. (a)ROI centrada en contranodo; (b)Ancho de hoja calculado. . 50

5.8. Superposición de hojas 51

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| 3.1. Análisis de los parámetros de aceptación | 19 |
| 5.1. Comparativa de los nodos detectados por el sistema vs los nodos medidos manualmente para una planta en 4 fechas distintas. | 48 |
| 5.2. Comparativa de las longitudes de hojas detectadas por el sistema vs las longitudes de hoja medidas manualmente para una planta en 4 fechas distintas. | 49 |
| 5.3. Comparativa de los anchos de hojas detectados por el sistema vs los anchos de hoja medidos manualmente para una planta en 4 fechas distintas. | 51 |

Introducción

1.1 Motivación

El cultivo de la soja se ha incrementado en las últimas décadas, transformándose en una de las principales producciones agrícolas de Argentina. El aumento de la superficie dedicada a esta actividad, ha provocado la disminución en la producción de otros cultivos. Esto es debido a las grandes rentabilidades obtenidas por la exportación.

Esta situación, trajo aparejado un aumento en las investigaciones científicas y tecnológicas en la rama de las ciencias agrícolas, para optimizar la productividad en las áreas sembradas. Uno de los mayores desafíos consiste en la disminución de las malezas que crecen en las zonas de cultivos, dado que las mismas compiten con la soja por los recursos naturales, como agua, minerales y luminosidad. La mayor herramienta para combatir las malezas es la utilización de potentes herbicidas, dentro de los cuales el glifosato es el más utilizado.

En los últimos años a partir de relevamientos de malezas realizados en la zona centro y sur de la provincia de Santa Fe - Argentina, se han encontrado muchas especies vegetales que son naturalmente tolerantes a las dosis de uso del herbicida glifosato [7]. La tolerancia es la capacidad innata que tienen los individuos de una especie de soportar la dosis de uso de un herbicida debido

a características morfológicas y/o fisiológicas que le son propias. Dentro de este gran grupo de especies se encuentra citada *Iresine difussa* Humb. Bonpl. Ex Willd. (Amaranthaceae) [14]. En la figura 1.1 se observa una imagen de esta planta.



Figura 1.1: *I. Diffusa*

Iresine difussa (pluma) es una maleza frecuente en los bordes de los lotes agrícolas y con problemas en el control con glifosato [9]. Es una planta herbácea o subarborescente, ramosa principalmente en la base, de hasta 2 m, posee rizomas superficiales de color rojizo. Las hojas son ovado-lanceoladas o lanceoladas. Las flores son blancas, en amplias panojas piramidales, con espigas alargadas y raquis veloso o pubescente de aspecto blanquecino. Su fruto es un utrículo pubescente, semillas de 0,6 mm de diámetro, castañas o negruzcas. Es de ciclo primavero-estival y se reproduce por semillas y rizomas.

La combinación de la técnica de “labranza cero” (siembra directa) con el uso de cultivos de soja transgénicos resistentes al herbicida glifosato, determinó que muchas especies colonizaran los lotes y se constituyeran en “nuevas” especies de malezas [19]. El aumento en los problemas de manejo de *I. Diffusa* debido a los cambios producidos por estas técnicas de cultivo también ha ocasionado el subsecuente incremento del número de las aplicaciones como

así también de las dosis de herbicidas utilizadas [11]. Esto trae aparejado problemas de contaminación que reducen o limitan la utilidad de recursos naturales como el suelo, el agua, el aire, el paisaje y los alimentos, alterando la función, estructura y productividad de los ecosistemas [14].

En este contexto, para planificar e implementar nuevos sistemas mejorados de manejo de malezas, se necesita tener un mínimo de comprensión del comportamiento temporal y espacial de las poblaciones de malezas. En el caso particular del control químico de malezas es fundamental conocer la biología y las características de crecimiento de las malezas, principalmente en los estadios tempranos de desarrollo debido a que es el momento donde son más susceptibles de ser controladas con herbicidas, ya que el estado de desarrollo afecta la capacidad de absorción, transporte y procesos bioquímicos del herbicida dentro de la planta[18].

Tanto las diferencias arquitecturales de las malezas como la variabilidad en su morfología afectan la manera en que ellas adquieren recursos del medio como también contribuyen a diferencias en la intercepción de agroquímicos cuando estos son pulverizados sobre las mismas. También su arquitectura determina la capacidad de competencia entre especies (competencia maleza-cultivo). Dentro de la Morfología Vegetal, la Arquitectura Vegetal como ciencia surgió en el año 1970 basándose en estudios de los sistemas de ramificación de árboles tropicales, desarrollándose de esta manera un marco conceptual para la clasificación de las plantas. Se podría definir en forma sintetizada como la morfología dinámica que lleva a la “construcción” de una planta.

El análisis arquitectural es una herramienta que permite esclarecer las distintas adaptaciones que presentan las especies en lo que concierne a la ocupación del espacio tridimensional, intercepción de luz, y además, en el caso particular de malezas, la intercepción también de agroquímicos pulverizados.

De esta manera contribuye a la comprensión de la capacidad de crecimiento y producción de biomasa de una especie. El estudio de la arquitectura vegetal es una herramienta que permitirá optimizar su control, ya que la comprensión del rol de aquellas características de las especie que determinan el crecimiento en estadios tempranos permitiría identificar las diferentes estrategias utilizada por I. diffusa para su establecimiento.

El conocimiento de las “reglas” arquitecturales que gobiernan el desarrollo de la estructura de las plantas es importante para entender el funcionamiento de las mismas y, al proveer datos para la parametrización de modelos, facilitará el desarrollo de un enfoque de modelación funcional-estructural formalizado para investigar cómo interactúan las malezas con los cultivos dentro del agrosistema. El hecho de que no se dispone de información arquitectural de

I. diffusa y considerando el problema que representa la especie elegida como maleza invasora de campos dedicados a la siembra directa con aplicaciones intensivas de glifosato, se elige esta planta como modelo de estudio.

Los estudios en el campo de la arquitectura vegetal han progresado en las últimas décadas, transformándose en una herramienta muy útil para el estudio de la estructura de las plantas. La introducción de técnicas de procesamiento digital de imágenes para la detección de las características morfológicas de la planta I. diffusa, pretende convertirse en un primer eslabón para la optimización de los resultados en los estudios de esta área.

1.2 Estado del arte

En el área de análisis de los datos morfológicos característicos de las plantas, existen avances importantes, pero poco se ha realizado en la técnica de recolección de los mismos.

En la actualidad las técnicas de detección de características morfológicas de las plantas no se realizan mediante sistemas automáticos. Estas se basan en la medición de ciertos puntos esenciales con los cuales se logra clasificar las plantas para luego generar modelos.

Básicamente podemos clasificar las técnicas morfométricas aplicadas en Ciencias Biológicas para el estudio de las formas de la siguiente manera:

- **Morfometría Clásica:** es el método más utilizado y se basa en mediciones de la forma y tamaño de las plantas para poder identificarlas y luego clasificarlas. Las medidas se obtienen gracias al uso de calibres; estas mediciones se realizan en forma manual. Las desventajas en el uso de calibres es la cantidad de tiempo que lleva hacer la medición a una planta como así también la dificultad en obtener ángulos de inserción de ramas y adquirir en forma precisa coordenadas X,Y,Z de los ápices de las mismas.
- **Morfometría Geométrica:** definida como la fusión entre la geometría y la biología, comprende el estudio de la forma en un espacio bi o tridimensional [2] permitiendo investigar en profundidad los cambios morfológicos. La Morfometría Geométrica brinda una aproximación minuciosa y potente al cambio en la forma, que deberá tenerse en cuenta en los análisis futuros. En este caso los datos desde imágenes de plantas

o de determinados puntos digitalizados denominados “landmarks”, se pueden obtener de varias formas:

CTscans: la manera más potente de capturar la forma de la planta es a través de un sistema de tomografía computada (CT scans), pero la principal desventaja de estos dispositivos es su precio elevado y el hecho de que no son portátiles.

Sonic Digitizers: dispositivos que permiten obtener las coordenadas X, Y, Z de puntos respecto a un eje de referencia. Tienen elevado costo y no son aplicables a condiciones de campo. Se utilizan para ubicar los ápices de tallos, luego debe complementarse esta información con toma de datos manuales. Una desventaja de estos dispositivos es que la toma de datos es irreversible, ya que una vez tomados los datos, y debido a que la planta está en continuo desarrollo, no se puede volver a procesar en caso de algún inconveniente. Es de destacar que el elevado precio de estos dispositivos dificulta muchas veces la adquisición de los mismos.

Imágenes Fotográficas: este método consiste en capturar imágenes fotográficas para luego procesarlas. La ventaja de trabajar con fotografías es el bajo coste del procedimiento, la velocidad en la toma de datos y la disponibilidad de las imágenes para ser reprocesadas en otra ocasión. Una ventaja tanto de las fotografías como de otros métodos de Morfometría Geométrica, es que mediante el procesamiento digital, la información es trasladada directamente a un ordenador en un formato que puede ser analizado estadísticamente casi sin modificaciones.

1.3 Objetivos del Proyecto Final

Una vez introducida la tarea de interés y el marco general de trabajo, se enuncian a continuación los objetivos generales y particulares del presente Proyecto Final.

Los objetivos generales de este trabajo son los siguientes:

- Desarrollar un sistema que permita mejorar el proceso de recolección de datos característicos de las plantas mediante técnicas de procesamiento digital de imágenes.

- Incorporar nuevos recursos para la detección y medición de características morfológicas en las plantas.
- Colaborar con grupos de investigación de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) y la Facultad de Ciencias Agrarias (FCA) de la Universidad Nacional del Litoral (UNL) en el área del procesamiento digital de imágenes.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Diseñar el protocolo para la adquisición de imágenes de plantas.
- Diseñar e implementar algoritmos de procesamiento digital de imágenes para la detección de puntos característicos de las plantas.
- Realizar a partir de los puntos detectados la medición de parámetros de interés en la morfología vegetal.
- Elaborar una plantilla de informe de resultados acorde a las necesidades del usuario.

1.4 Alcances del Proyecto Final

En este proyecto se define un protocolo de captura de imágenes que será utilizado por personal de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional del Litoral para la toma de las mismas, como así también un conjunto de algoritmos que permiten la detección de ciertas características morfológicas de las plantas.

Una vez obtenidos los datos característicos de las plantas, mediante el sistema desarrollado en el marco de este proyecto final, estos serán procesados por el sistema AMAPMod (software desarrollado en Francia) para análisis de la forma de la planta y utilizados para generar modelos de crecimiento.

Es necesario destacar que el proyecto se limita a plantas de la especie *Iresine diffusa* Humb. & Bonpl. ex Willd. var. *Diffusa*.

En este proyecto no se pretende lograr un prototipo comercial, ni desarrollar un sistema completo de detección de características morfológicas de la planta; sino que se expone un conjunto de algoritmos que sirven de punto de partida en la detección de ciertas características, que permiten plasmar bondades, dificultades e interdependencia de dichos algoritmos.

Revisión de conceptos

2.1 Imagen Digital

Una imagen puede ser definida como una función bidimensional $f(x, y)$, donde x e y son las coordenadas espaciales y el valor de f en cualquier punto (x, y) se denomina intensidad o nivel de gris. Si x , y y f son valores discretos, se obtiene una imagen digital. Por convención se toma la esquina superior izquierda como el origen de coordenadas. Por lo tanto, una imagen digital puede ser representada como una matriz de $M \times N$ elementos llamados píxeles, donde M es la cantidad de filas y N la cantidad de columnas. Ver [12].

$$f(x, y) = \begin{bmatrix} f(0, 0) & f(0, 1) & \dots & f(0, N) \\ f(1, 0) & f(1, 1) & \dots & f(1, N) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f(M, 0) & f(M, 1) & \dots & f(M, N) \end{bmatrix}$$

2.2 Umbralización de histograma

La idea principal consiste en segmentar los objetos de una imagen que nos interesan del resto, basados en la información de brillo. Con este objetivo en mente, se procede a obtener el histograma de la imagen, el cual nos permite conocer la distribución de las intensidades [12]. Conociendo el rango de intensidad en el cual podemos ubicar el objeto, se realiza la segmentación basada en un parámetro T , a partir la siguiente fórmula:

$$f_T(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{si } f(x, y) > T \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (2.1)$$

2.3 Modelos de Color

Un modelo de color es una representación matemática que describe la forma en que los colores pueden ser representados como un conjunto de componentes. Cada modelo de color representa un método diferente de descripción de los colores. Ver [12].

El procesamiento de imágenes digitales es muy útil para segmentar diferentes objetos en aplicaciones relacionadas con las ciencias agrarias . Por ejemplo para separar la maleza de la planta en estudio. Esto no es una tarea trivial, dado que existen solapamientos y oclusiones entre las mismas. Dentro del procesamiento de imágenes, una de las principales técnicas de segmentación es la segmentación por color. La idea principal del análisis del color es obtener datos relevantes en algún modelo, para crear patrones que puedan llegar a ser utilizados por otros procesos. Existen varias representaciones o modelos de color. Los dos modelos empleados en este trabajo son el RGB y el HSI.

- Modelo RGB: está compuesto por los colores rojo, verde y azul. Dichos componentes son las cantidades de luz de estos colores que contiene un color RGB y se miden en valores enteros de 0 a 255. Es un modelo aditivo es decir, cuanto más rojo, verde y azul se agregue, más tiende el color resultante al blanco, cuando el valor del trio es 0, se obtiene el color negro. Este modelo es muy utilizado en monitores, cámaras fotográficas, etc. En la figura 2.1 se observa el modelo RGB.

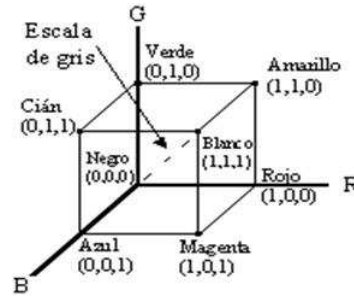


Figura 2.1: Modelo RGB

- Modelo HSV: es considerado más intuitivo dado que está relacionado a la forma en que las personas perciben los colores. Está compuesto por tres componentes:
 - Matiz: está relacionado con el pigmento de un color y se mide en grados de 0 a 359.
 - Saturación: define la pureza del color y se mide entre 0 y 1, cuanto más alto más puro es el color.
 - Intensidad: determina la luminosidad que posee el color.

En la figura 2.2 se observa el modelo HSV.

Las fórmulas para transformar del espacio RGB al HSI son las siguientes:

$$I = \frac{R + G + B}{3} \quad (2.2)$$

$$S = 1 - \frac{3}{R + G + B} \min(R, G, B)$$

$$W = \cos^{-1}\left(\frac{R - \frac{1}{2}(G + B)}{\sqrt{[(R - G)^2 + (R - B)(G - B)]}}\right) \quad (2.4)$$

$$H = \begin{cases} W & \text{si } G > B \\ 2\pi - W & \text{si } G < B \end{cases} \quad (2.5)$$

donde R es la componente Roja, G es la componente Verde, B es la componente Azul, H es la componente Matiz, S es la componente Saturación, I es la componete Intensidad y W es el ángulo pre calculado.

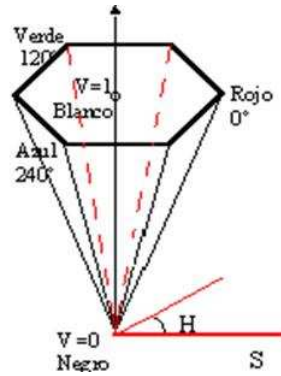


Figura 2.2: Modelo HSV

2.4 Transformaciones morfológicas

El objetivo de las transformaciones morfológicas es la extracción de estructuras geométricas en los conjuntos sobre los que se opera, mediante la utilización de otro conjunto de forma conocida denominado elemento estructurante. El tamaño y la forma del elemento depende del resultado que se desea obtener. Las operaciones morfológicas aplican un elemento estructural a la imagen de entrada, sin cambiar el tamaño de la imagen de salida. Ver [12].

- **Erosión:** es el resultado de comprobar si el elemento estructurante B , está totalmente incluido dentro del conjunto A . Cuando esto no ocurre, el resultado de la operación es el conjunto vacío. Sobre cada píxel de A se superpone el origen de B , luego si B está completamente contenido en A , entonces el píxel de salida es puesto a 1. La erosión se basa en reducir la cantidad de píxeles del entorno de un objeto. Este operador es lo opuesto a la dilatación, logrando efectos de encogimiento, contracción, o reducción.

$$A \ominus B = \{z | B_z \subseteq A\} \quad (2.6)$$

donde B_z es la traslación de B .

- **Dilatación:** El resultado de la dilatación es el conjunto de puntos origen del elemento estructurante B tales que el elemento estructurante contiene algún elemento del conjunto A , cuando el elemento se desplaza por el espacio que contiene a ambos conjuntos. La dilatación se basa en

umentar el nivel de los valores de los píxeles en el entorno de los objetos presentes en la imagen. Este operador es similar a la convolución y es comúnmente conocido como relleno, expansión o crecimiento.

$$A \oplus B = \{z | (\hat{B})_z \cap A \neq \emptyset\} \quad (2.7)$$

donde $(\hat{B})_z$ es la reflexión de B con respecto a su origen y un desplazamiento z.

2.5 Transformada de Hough

La Transformada de Hough (TH) permite encontrar características geométricas de acuerdo a la transformación que se defina. Para la detección de segmentos rectilíneos, se puede definir la TH a partir de la ecuación de la recta. Es una técnica muy robusta frente al ruido y a la existencia de huecos en la frontera del objeto [12].

Para aplicar la transformada de Hough a una imagen es necesario obtener primero una imagen binaria de los píxeles que forman parte de la frontera del objeto. El objetivo de la transformada de Hough es encontrar puntos alineados que puedan existir en la imagen, es decir, puntos en la imagen que satisfagan la ecuación polar de la recta, para distintos valores de ρ y θ . Si consideramos un punto (x_i, y_i) y la ecuación en forma explícita de la recta $y_i = ax_i + b$ hay un número infinito de rectas que pasan por (x_i, y_i) . Todas ellas satisfacen la anterior ecuación al variar los valores de a y b . Sin embargo, si se define la ecuación de la recta en forma polar: $\rho = x \cos \theta + y \sin \theta$. Donde ρ es la longitud de una normal desde el origen hasta la línea y θ es el ángulo de ρ con respecto al eje x , se logra entonces obtener la ecuación de una simple recta para un par fijo (x_i, y_i) en el espacio paramétrico ρ, θ . Por tanto hay que realizar una transformación entre el plano imagen (coordenadas $x-y$) y el plano o espacio de parámetros (ρ, θ) . Cualquier línea recta en una imagen es representada en un punto simple (ρ, θ) en el espacio paramétrico (ρ, θ) . Puntos colineales (x_i, y_i) con $i = 1, 2, 3 \dots N$ son transformados en N curvas sinusoidales que se intersectan en el plano (ρ, θ) . Para aplicar la transformada de Hough es necesario discretizar el espacio de parámetros en una serie de celdas denominadas celdas de acumulación. Esta discretización se realiza sobre los intervalos (ρ_{min}, ρ_{max}) y $(\theta_{min}, \theta_{max})$. Las celdas acumuladoras con una magnitud superior a un cierto umbral pueden ser consideradas como

posibles líneas. Por cada una de estas celdas se puede generar una recta en la imagen original.

La figura 2.3 muestra una recta en el espacio XY y las correspondientes senoidales generadas en el espacio (ρ, θ) por medio de la transformación.

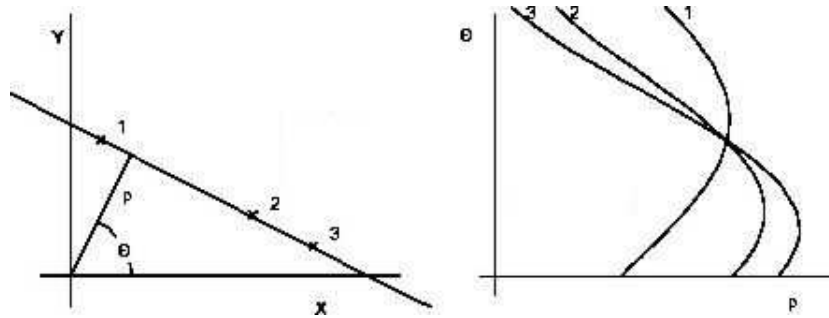


Figura 2.3: Transformación de Hough

La figura 2.4 muestra una imagen transformada al espacio $\rho\theta$ y el resultado de la anti transformación al espacio XY .

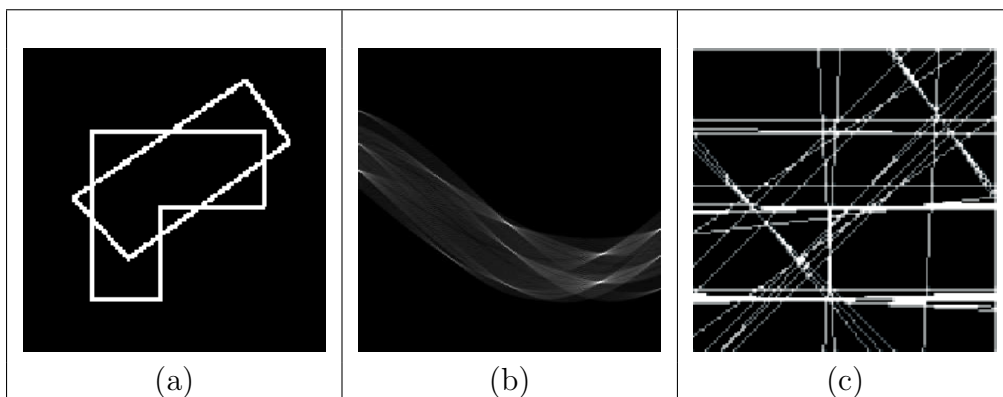


Figura 2.4: (a) Imagen original en plano XY ; (b) Imagen en plano $\rho\theta$; (c) Imagen reconstruida en el plano XY .

2.6 Detección de bordes

Un borde se puede definir como la transición entre dos regiones de niveles de gris significativamente distintos. Suministra una valiosa información

sobre las fronteras de los objetos y puede ser utilizada para segmentar la imagen y reconocer objetos. La mayoría de las técnicas para detectar bordes emplean operadores locales basados en distintas aproximaciones discretas de la primera y segunda derivada de los niveles de grises de la imagen [12].

En el caso de funciones bidimensionales $f(x, y)$, la derivada es un vector que apunta en la dirección de la máxima variación de $f(x, y)$ y cuyo módulo es proporcional a dicha variación. Este vector se denomina gradiente y se define:

$$\nabla f(x, y) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} \\ \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \end{bmatrix} \quad \text{Mag} [\nabla f(x, y)] = \sqrt{\left(\frac{\partial f(x, y)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f(x, y)}{\partial y}\right)^2}$$

donde Mag es la magnitud de $f(x, y)$.

Para calcular el gradiente se utilizan diferentes máscaras ortogonales, una máscara detecta contornos horizontales y la otra contornos verticales, obteniendo dos imágenes de gradiente. Un pixel se declara como borde si el valor del gradiente supera cierto umbral.

Las máscaras más utilizadas son:

- Sobel:

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}$$

- Prewitt:

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

Estas máscaras se convolucionan con la imagen original para calcular las aproximaciones a dichas derivadas.

2.7 Correspondencia con máscaras

Esta técnica (en inglés, *template matching*) es utilizada para encontrar porciones de un objeto. La misma consiste en comparar una porción de imagen con una plantilla que posee las características deseables de obtener. La

implementación más utilizada es la correlación entre dos imágenes. La correlación entre dos señales es una aproximación estándar a la detección de características [8], como así también forma parte de técnicas avanzadas de reconocimiento[3].

El dominio frecuencial es menos eficiente para el cálculo de la correlación normalizada, por lo que se utiliza el dominio espacial. Debido al costo computacional de la convolución en el dominio espacial, varias técnicas inexactas pero rápidas se han desarrollado[1].

El coeficiente de correlación brinda una estimación del grado de similitud entre la porción de imagen y la plantilla. Para obtener el valor centramos la plantilla en cada punto de la imagen y medimos la similitud de cada punto de la plantilla con el correspondiente de la imagen. El procedimiento es repetido para la imagen entera, y el punto que conduce al mejor emparejamiento es juzgado como el punto donde la forma (dada por la plantilla) está dentro de la imagen. En la ecuación 2.8 se observa la fórmula de la correlación entre la plantilla y la imagen.

$$c(s, t) = \sum_x \sum_y [f(x, y) - w(x - s, y - t)]^2 \quad (2.8)$$

donde $s = 0, 1, 2, \dots, M - 1$, $t = 0, 1, 2, \dots, N - 1$, y la suma se toma sobre la región de imagen donde la imagen f y la plantilla (imagen) w se solapan. Para cualquier valor de (s, t) dentro de $f(x, y)$, la aplicación de la fórmula 2.8 produce un valor de c . Como s y t varían, $w(x, y)$ se mueve alrededor del área de la imagen, dando la función $c(s, t)$. El mínimo valor de $c(s, t)$ indica la posición donde $w(x, y)$ mejor coincide con $f(x, y)$.

La figura 2.5 muestra un diagrama de esta técnica

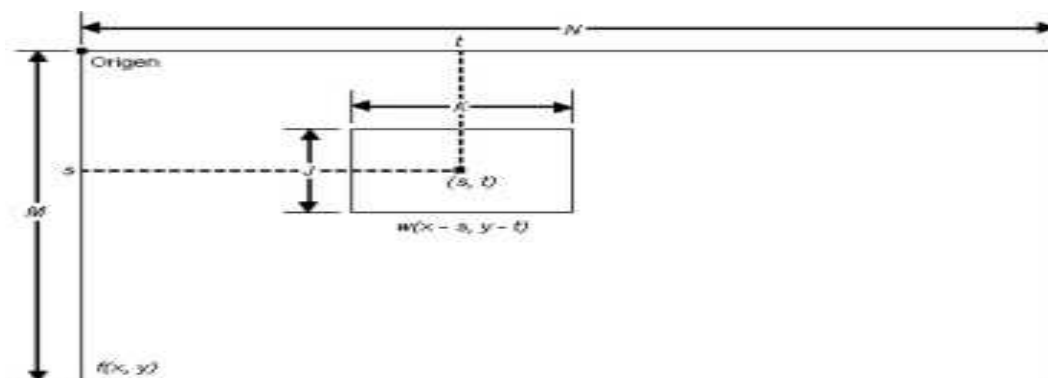


Figura 2.5: Correspondencia con máscaras

Análisis y Diseño del Sistema

3.1 Protocolo para la captura de imágenes

La utilización de un adecuado protocolo para captura de imágenes, reduce el tiempo de pre-procesamiento como así también la complejidad de las técnicas de procesamiento digital de imágenes. Es importante destacar que una imagen que no cumpla con los requisitos del protocolo puede provocar una baja tasa de aciertos en la etapa de procesamiento. El protocolo se diseña en base a las características deseables de detectar, a las herramientas tecnológicas y al espacio físico donde se encuentran las plantas.

Definición del protocolo:

- Iluminación del ambiente:
La captura de imágenes será realizada en un ambiente cerrado, utilizando luz fluorescente artificial, la cual es producida por dos tipos de tubos fluorescentes con longitud de onda diferente. Las lámparas fluorescentes tienen una gran superficie que emite luz, produciendo mayormente una luz difusa con poca brillantez y un campo de iluminación homogéneo, sin calor excesivo.
- Ubicación de la planta:
La planta a ser fotografiada estará ubicada en una maceta de color

negro, plantada en tierra con una superficie de arena y una hoja blanca detrás del tallo. Esto permite obtener un mayor contraste entre la planta y el resto. La maceta se identifica con un número dibujado en la misma, el cual identifica a la planta, además presenta una marca que permite conocer los diferentes planos para la toma de imágenes, los mismos son perpendiculares y se denominan 3 y 6. Se toman dos fotos de la planta, una correspondiente al plano 6, el cual se obtiene ubicando la marca de la maceta frente a la cámara de fotos y otra correspondiente al plano 3, el cual se obtiene rotando la maceta 90° en sentido antihorario. En la imagen 3.1 se puede observar 2 tomas de fotos para los planos 3 y 6.

Se coloca una escala de referencia con dos cuadrados de 5 mm pintados de algún color, la cual estará en el mismo plano que el tallo de la planta y perpendicular a la cámara. Dicha escala permite el uso de medidas reales a la hora realizar los cálculos. Es importante destacar, que si la escala se encuentra por delante o por atrás del trallo, se perderá la escala de referencia. Finalmente la planta se posiciona delante de una pared de color blanco perteneciente a la habitación.

- Posicionamiento de la cámara fotográfica:
La cámara se colocara a una distancia de 1 m. desde la lente de la cámara al tallo y la visión de la misma deberá ser perpendicular a dicho plano. Se utiliza un trípode para evitar movimiento en la toma de la foto.
- Captura de la imagen:
Al momento de la captura se selecciona el máximo nivel de acercamiento sin perder detalle de la planta y se desactiva la opción de flash, debido a que dicha luz provoca una iluminación no deseada. Es necesario destacar que el origen de la planta debe estar visible y no debe estar solapado por alguna de las hojas.

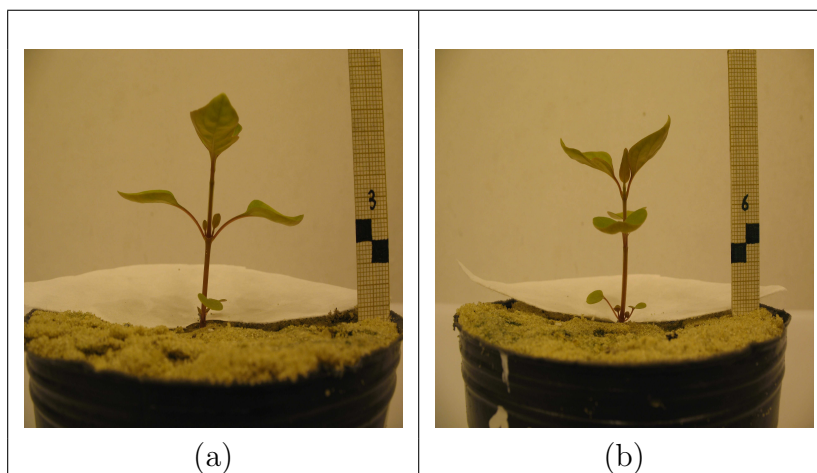


Figura 3.1: Imágenes capturadas mediante protocolo: (a)Planta posicionada en 3; (b)Planta posicionada en 6.

3.2 Análisis de las tecnologías utilizadas

Una decisión fundamental a la hora de iniciar la implementación del módulo de detección de características morfológicas de las plantas, es la elección adecuada del lenguaje de programación a utilizar, como así también las bibliotecas necesarias para el procesamiento de la imagen. Se analizan dos lenguajes preponderantes en el área de procesamiento de imágenes digitales: Java y C++. Debido a esto, es necesario el análisis de ventajas y desventajas que proporcionan cada uno de ellos.

En una primera etapa se realizan distintas pruebas de conceptos para cada una de las herramientas con el objetivo de seleccionar la opción mas adecuada. La primer prueba de concepto se realizó utilizando el lenguaje C++, la biblioteca CImg y el sistema operativo Linux. La segunda se realizó utilizando el lenguaje Java, la biblioteca gráfica Java Advanced Image (JAI) y el sistema operativo Microsoft Windows. Para cada una de las pruebas se realizó un pequeño prototipo en el cual se tuvo en cuenta los siguientes parámetros de aceptación:

- Orientación a objetos: Es una paradigma que proporciona conceptos y herramientas que permiten modelar y representar el mundo real. La programación orientada a objetos (POO) es una evolución de la pro-

gramación estructurada. La POO se basa en dividir el programa en pequeñas unidades lógicas de código. A estas pequeñas unidades lógicas de código se les llama objetos. Los objetos son unidades independientes que se comunican entre ellos mediante mensajes. Esta forma de programar permite crear sistemas de niveles empresariales y con reglas de negocios muy complejas. Las ventajas de este paradigma son:

- Reutilización de código.
 - Construcción de prototipos.
 - Facilita el trabajo en equipo.
 - Mantenimiento del software.
-
- Multiplataforma: Los sistemas multiplataforma están diseñados para soportar aplicaciones que serán ejecutadas en los más variados sistemas operativos, desde Unix a Windows Nt, pasando por Mac y estaciones de trabajo, sobre arquitecturas distintas y con sistemas operativos diversos. Esto se debe a que el archivo compilado es independiente de la arquitectura en la que se va a ejecutar, solo depende de su interprete.
 - Licencia: Existen diferentes licencias de software. Estas dependen del uso, distribución y alcance. Algunos de estas licencias permiten que los programas sean modificados y redistribuidos, otras evitan que el software sea utilizado como parte de otro software propietario, además, existen las licencias con fines educativos las cuales son muy utilizadas en investigación. Por último, se encuentran las licencias pagas, las cuales en algunos casos permiten modificar el código fuente.
 - Experiencia previa: Uno de los puntos más importantes a la hora de comenzar un desarrollo de software es la experiencia previa que poseen los integrantes del equipo en cuestión. Una elección de una tecnología no conocida requiere tiempo extra de entrenamiento y aprendizaje, lo cual trae aparejado mayor complejidad y más tiempo de desarrollo.
 - Documentación de la biblioteca de procesamiento de imágenes: Es de suma importancia que la tecnología a utilizar posea una adecuada documentación. Documentación no solo se refiere al código, sino también a la posibilidad de consulta de foros, tutoriales, ejemplos, etc.

En la tabla 3.1 se muestra una comparativa basada en experiencias personales de los diferentes parámetros de aceptación, en la cual se marca con un

valor en el rango 0 a 5 el nivel de aceptación. Donde 1 es malo, 2 es regular, 3 es bueno, 4 es muy bueno y 5 es excelente.

Tabla 3.1: Análisis de los parámetros de aceptación

| Parámetro | 1° CASO | 2° CASO |
|--|---------|---------|
| Orientación a objetos | 4 | 2 |
| Multiplataforma | 4 | 1 |
| Licencia | 3 | 4 |
| Experiencia previa | 4 | 2 |
| Documentación biblioteca proc imágenes | 3 | 2 |

En el primer caso de análisis se observa el pleno uso del paradigma de programación orientada a objetos, debido a que Java es un lenguaje totalmente orientado a objetos y la biblioteca para procesamiento digital de imágenes JAI fue desarrollada respetando este paradigma. Java es un lenguaje multiplataforma en el cual, el código compilado es interpretado independientemente de la plataforma, siendo solo necesario el uso de la maquina virtual (JVM) adecuada. Este caso posee diversos tipos de licencias. Para el lenguaje de programación la licencia es de uso libre; la licencia de la biblioteca JAI es libre solo para usos educativos y las bibliotecas de persistencia y generación de datos son libres. El sistema operativo utilizado es de licencia paga. La documentación de la biblioteca de procesamiento de imágenes no es abundante, pero se ha podido consultar diversos foros y ejemplos en Internet.

Por último cabe destacar la importancia de la experiencia previa que se posee en la utilización e integración de estas tecnologías, dado que esto permite un desarrollo ágil.

En lo que respecta al segundo caso de análisis el lenguaje de programación C++ es apto para el desarrollo de aplicaciones orientadas a objetos, sin embargo la biblioteca para procesamiento digital de imágenes CImg no lo es, dado que está implementada como un conjunto de funciones. El lenguaje de programación C++ es dependiente de la plataforma, dado que el sistema necesita ser compilado dependiendo del sistema operativo.

Las licencias son libres, tanto para el lenguaje como para la biblioteca de procesamiento de imágenes y como así también para el sistema operativo. Se puede decir que la documentación de la biblioteca de procesamiento de imágenes CImg no es abundante y se hace difícil encontrar foros con información relacionada. La experiencia previa en la utilización de estas herramientas no es profunda.

Luego de analizar ambas opciones se decide elegir el primer caso, dado que la programación orientada a objetos como así también el lenguaje Java son herramientas de vanguardia en la forma de programación de sistemas actuales y a que la experiencia de los investigadores en estas herramientas es mayor a la que se posee en las tecnologías utilizadas en el segundo caso.

3.3 Casos de uso

Un caso de uso es una secuencia de pasos que realiza un sistema en respuesta a un evento generado por un actor sobre dicho sistema. Los diagramas de casos de uso muestran de manera gráfica la relaciones entre los actores y los casos de usos, como así también con otros sistemas [16].

| |
|--|
| Caso de uso: Cargar imágenes |
| Actor: Usuario |
| Curso normal: |
| <ol style="list-style-type: none"> 1) El caso de uso comienza cuando el usuario carga la imagen 3. 2) El usuario selecciona dos puntos extremos en el cuadrado de color de la escala de la imagen 3. 3) El sistema valida que se hayan seleccionado dos puntos de la imagen 3. 4) El sistema calcula la escala de la imagen 3. 5) El usuario carga la imagen 6. 6) El usuario selecciona dos puntos extremos en el cuadrado de color de la escala de la imagen 6. 7) El sistema valida que se hayan seleccionado dos puntos de la imagen 6. 8) El sistema calcula la escala de la imagen 6. 9) Fin del caso de uso. |
| Curso alternativo: |
| <ol style="list-style-type: none"> 3A.1) El sistema emite un mensaje informando que se deben seleccionar dos puntos de la imagen 3. 7A.1) El sistema emite un mensaje informando que se deben seleccionar dos puntos de la imagen 6. |

| |
|--|
| Caso de uso: Procesar imágenes |
| Actor: Usuario |
| Curso normal: |
| <ol style="list-style-type: none"> 1) El caso de uso comienza cuando el usuario presiona el botón procesar de la imagen 3. 2) El sistema pre procesa la imagen 3. 3) El sistema detecta el origen del tallo de la imagen 3. 4) El sistema detecta la ubicación y ancho del tallo de la imagen 3. 5) El sistema detecta el ápice de la imagen 3. 6) El sistema detecta la ubicación de los nodos de la imagen 3. 7) El sistema detecta el largo de la hoja de la imagen 3. 8) El sistema pre procesa la imagen 6. 9) El sistema detecta el origen del tallo de la imagen 6. 10) El sistema detecta la ubicación y ancho del tallo de la imagen 6. 11) El sistema detecta el ápice de la imagen 6. 12) El sistema detecta la ubicación de los nodos de la imagen 6. 13) El sistema detecta el largo de la hoja de la imagen 6. 14) El sistema calcular el ancho de las hojas de la imagen 3 y 6. 15) El sistema muestra las imágenes de ambas plantas con las características detectadas. 16) Fin del caso de uso. |
| Curso alternativo: No aplica. |

| |
|---|
| Caso de uso: Persistir datos |
| Actor: Usuario |
| Curso normal: |
| <ol style="list-style-type: none"> 1) El caso de uso comienza cuando el usuario presiona el botón guardar. 2) El sistema persiste los datos. 3) Fin del caso de uso. |
| Curso alternativo: No aplica. |

| |
|--|
| Caso de uso: Exportar datos |
| Actor: Usuario |
| Curso normal: |
| <ol style="list-style-type: none"> 1) El caso de uso comienza cuando el usuario presiona el botón exportar. 2) El sistema exporta los datos persistidos a un archivo excel. 3) Fin del caso de uso. |
| Curso alternativo: No aplica. |

3.4 Diagrama de clases

Un diagrama de clase muestra un conjunto de clases, interfaces, colaboraciones y sus relaciones. Estos diagramas se utilizan para modelar una vista estática del sistema como así también para especificar y documentar modelos estructurales.

El diagrama de clases del sistema se divide en cuatro paquetes:

- Persistencia (ver imagen 3.2).
- Servicio (ver imagen 3.3).
- Modelo (ver imagen 3.4).
- Útil (ver imagen 3.5).
- Visualización (ver imagen 3.6).

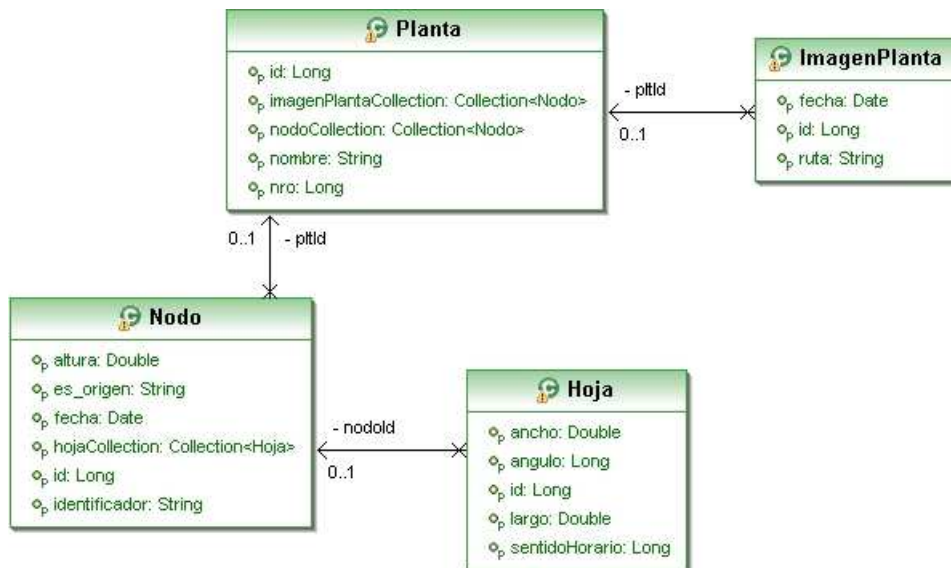


Figura 3.2: Diagrama de clase paquete Persistencia

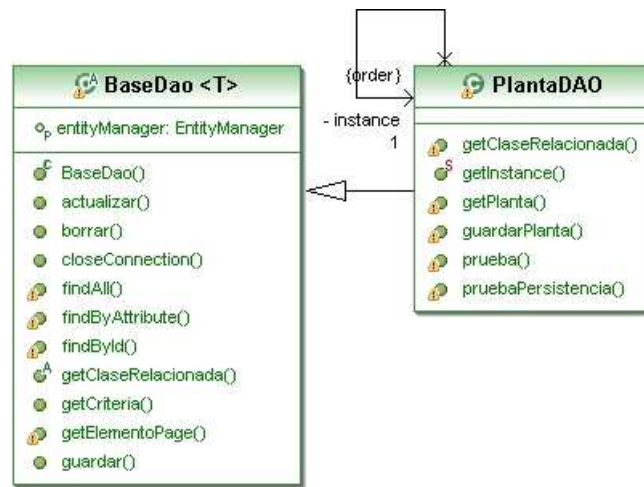


Figura 3.3: Diagrama de clase paquete Servicio

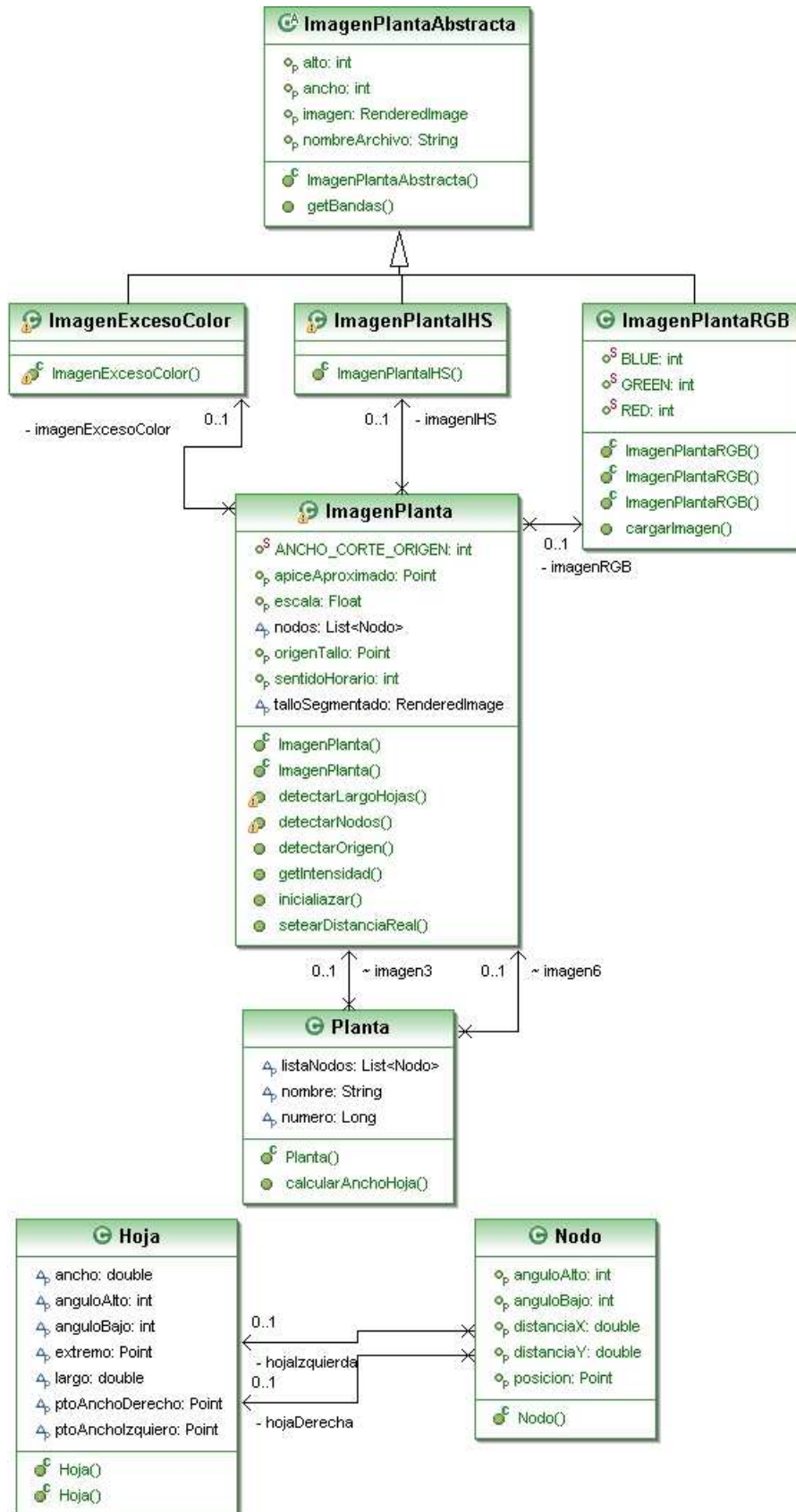


Figura 3.4: Diagrama de clase paquete Modelo

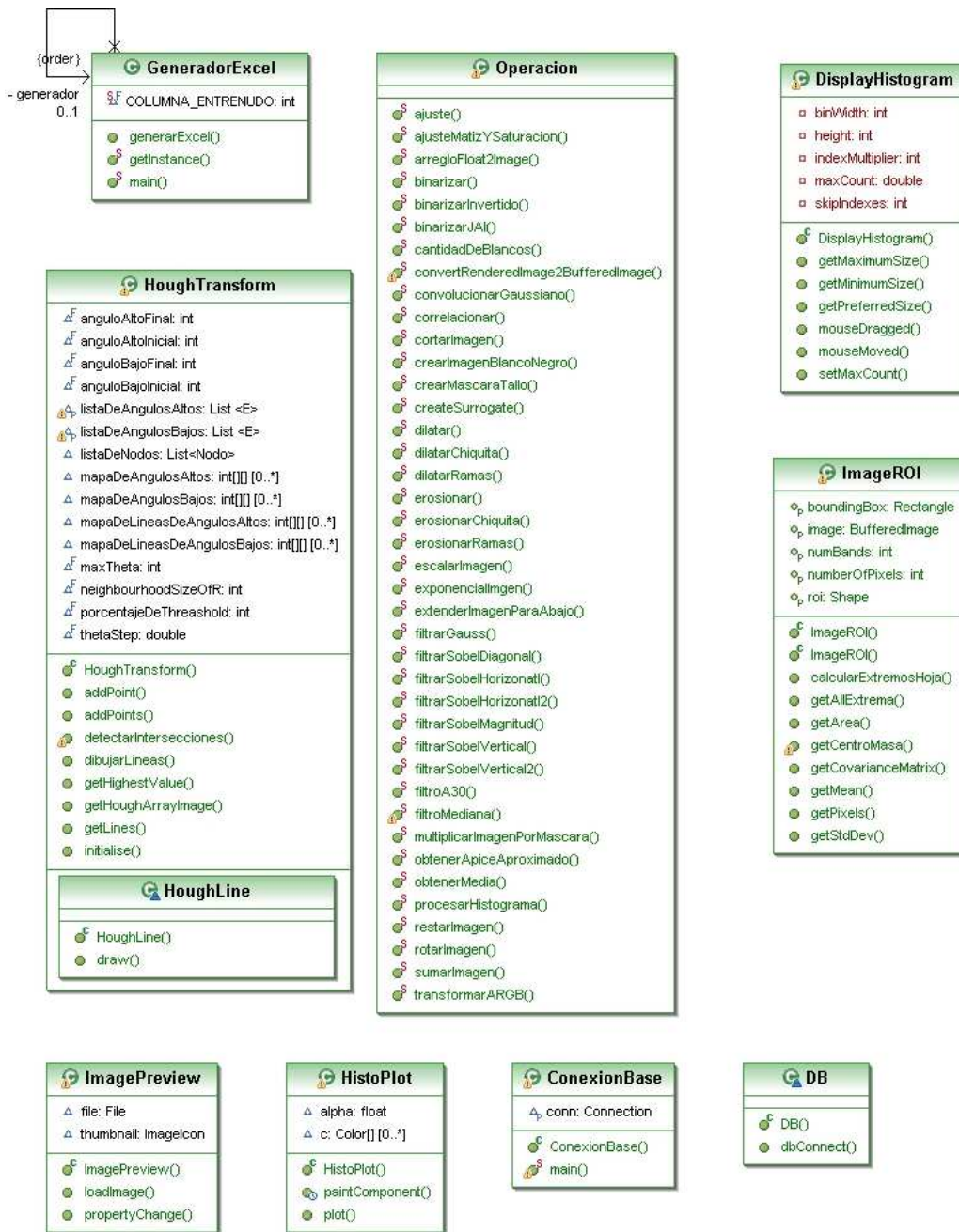


Figura 3.5: Diagrama de clase paquete Util

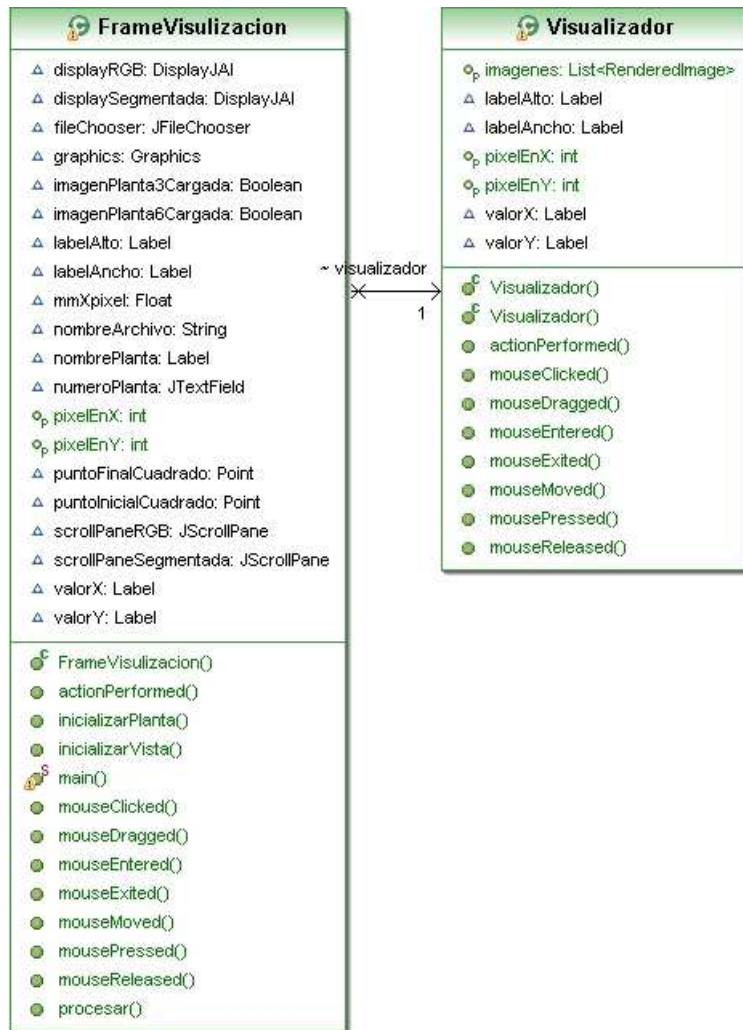


Figura 3.6: Diagrama de clase paquete Visualización

Implementación del sistema

4.1 Introducción

El sistema de detección de características morfológicas de la planta *I. difusa* esta compuesto por tres bloques:

1. Preprocesamiento de la imagen.
2. Detección de características.
3. Presentación de resultados.

El primer bloque se encarga de aplicar técnicas de procesamiento digital de imágenes, con el objetivo de mejorar la imagen de entrada para su posterior procesamiento. El siguiente bloque aplica los algoritmos de detección de características morfológicas de las plantas propiamente dichos. Por último las características obtenidas se presentan en pantalla, se guardan a una base de datos y se exportan a una planilla de cálculo. En la figura 4.1 se observa el diagrama de bloques del sistema.



Figura 4.1: Diagrama de bloques

4.2 Datos de prueba

Las imágenes utilizadas para las pruebas fueron tomadas en la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional del Litoral, ubicada en la ciudad de Esperanza, Santa Fe.

Las capturas de las imágenes fueron realizadas en una cámara de crecimiento por personal de la FCA basadas en el protocolo propuesto en esta investigación. Dicho invernadero presenta una temperatura entre 25° y 28° durante todo el año y consta de tubos fluorescentes. Cada 15 días se tomaron 2 fotos de cada planta en estudio, cada una de ellas muestra la imagen de la planta en las posiciones definidas por el protocolo desarrollado en la sección 3.1.

Para esta investigación se utilizaron 10 plantas de la misma especie. Las imágenes fueron adquiridas con un tamaño de 3648 x 2736 píxeles. Se obtuvieron un total de 250 fotos durante las diferentes etapas de crecimiento.

4.3 Preprocesamiento

El objetivo principal consiste en segmentar los objetos de interés del fondo.

Una primera intención consistió en separar las partes de la imagen tomando en cuenta las capas RGB. Para esto es necesario conocer en qué rango de valores de cada capa se encuentran dichos objetos, lo cual se logra experimentalmente utilizando un conjunto de imágenes de prueba. Los rangos de valores se forman calculando el promedio de la media y la varianza de los diferentes objetos a detectar. Por medio de este enfoque no se obtienen buenos resultados, debido a que los elementos varían de color a lo largo del tiempo, como así también varían de planta en planta.

Una segunda intención consistió en resaltar los valores característicos de las hojas aplicando el criterio de exceso de verde (ExG)[20], el cual resulta muy bueno para discriminar las hojas del fondo y consiste en una transformación píxel a píxel de las componentes del espacio RGB.

$$ExG = \begin{cases} \frac{R+G+B}{2G-R-B} & \text{si } 2G \neq R+B \\ 0 & \text{si } 2G = R+B \end{cases} \quad (4.1)$$

Mediante este concepto se realiza una adaptación para segmentar las partes rojizas del resto de la imagen utilizando la siguiente transformación:

$$ExR = \begin{cases} \frac{R+G+B}{2R-B-G} & \text{si } 2R \neq G+B \\ 0 & \text{si } 2R = G+B \end{cases} \quad (4.2)$$

En la figura 4.2 se observa el resultado de aplicar el criterio de ExG y ExR normalizado entre $[0,255]$ y para un umbral definido por experimentación en 100. Esta figura muestra que la técnica no obtiene buenos resultados dado que no es posible segmentar el origen del tallo del suelo.

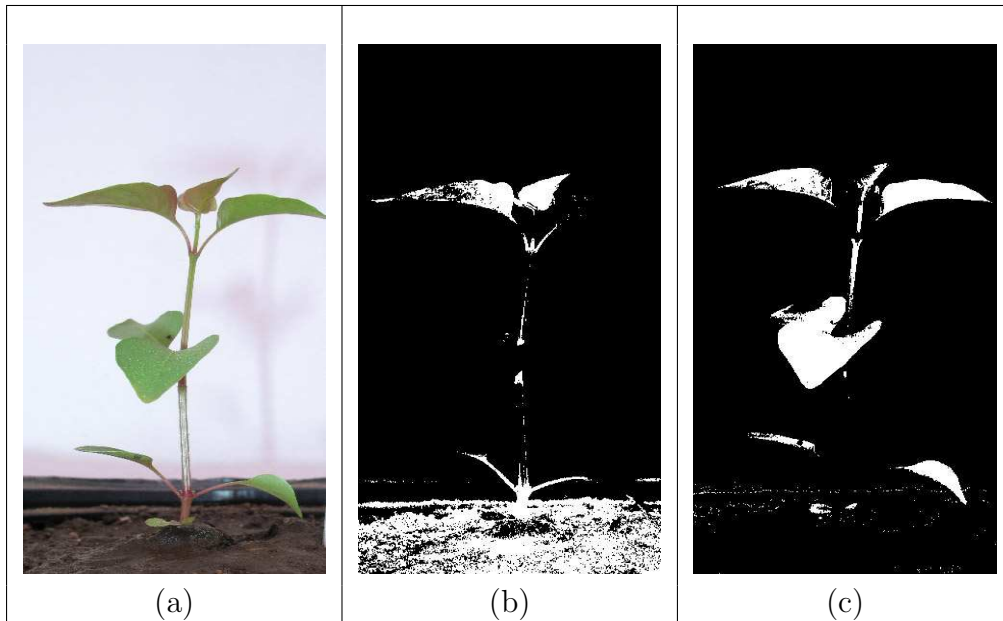


Figura 4.2: (a)Planta; (b)Imagen Exceso de Rojo normalizada en $[0,255]$ y unmbalizada en 100; c)Imagen Exceso de Verde normalizada en $[0,255]$ y unmbalizada en 100

El último intento consistió en transformar la imagen al espacio HSV.

La inspección de esta transformación muestra que el rango de valores en los cuales se encuentra la tierra y el tallo se solapan, lo cual permite concluir que no es sencillo segmentar el tallo mientras exista tierra. Una solución a este problema consiste en aplicar una hoja de color blanco por encima de la superficie del suelo o bien utilizar arena en vez de tierra, dado que el rango de H y S de la misma no se solapa con el del origen del tallo.

La figura 4.3 muestra la separación de la imagen en las componentes del modelo RGB y HSV para una imagen de planta sobre arena y con una hoja blanca por encima de la superficie del suelo.

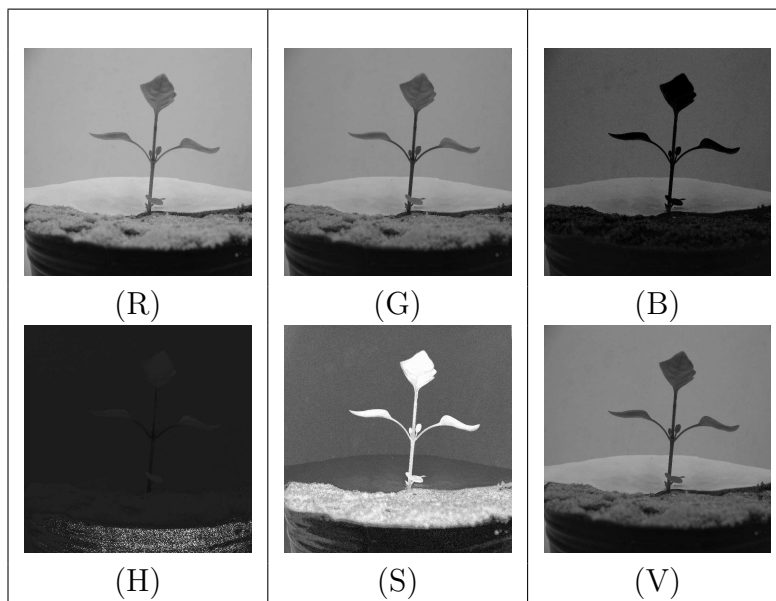


Figura 4.3: (R)Componente Roja; (G)Componente Verde; (B)Componente Azul; (H)Componente Matiz; (S)Componente Saturación; (I)Componente Intensidad.

Luego de segmentar la imagen, se procede a binarizarla y se aplica la técnica morfológica erosión con el objetivo de limpiar la imagen, eliminando datos espurios. En la figura 4.4 se observa el resultado de la segmentación por medio de las componentes HSV utilizando arena como suelo.

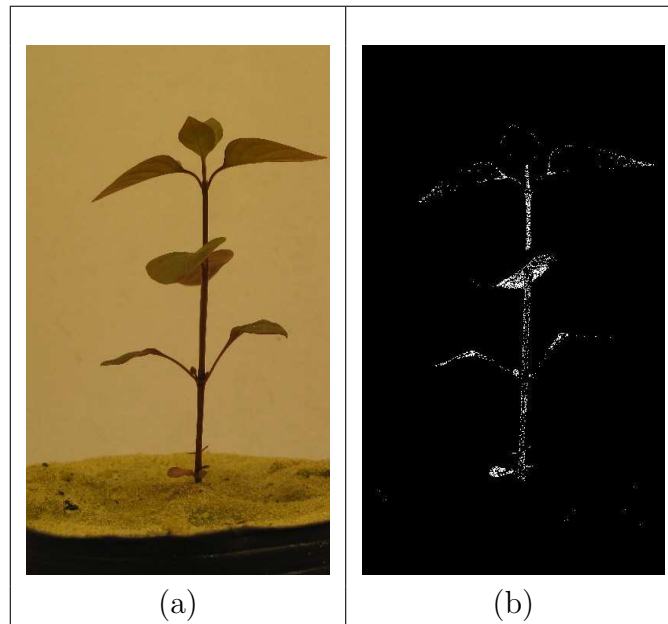


Figura 4.4: (a)Planta; (b)Planta segmentada HSV con arena

4.4 Detección de características

Este proceso consta de 5 pasos los cuales son totalmente dependientes. El primer eslabón de esta cadena consiste en la detección del origen, el cual se encuentra en el punto donde el tallo de la planta intersecta el suelo. La detección fallida de esta característica imposibilitará la detección de las restantes. En la siguiente etapa se segmenta el tallo, obteniendo el ancho y el punto más alto del mismo. Una vez concluida esta etapa, se prosigue a la fase de detección de los nodos y al ajuste de los mismos. Se denomina nodo, al punto en donde dos ramas se intersectan con el tallo. A continuación se detecta el largo de las hojas respectivas a cada nodo detectado. Este proceso es repetido para las dos imágenes que representan la planta. Al concluir ambas iteraciones se procede a la detección del ancho de las hojas. Esta última etapa utiliza la información obtenida en ambas imágenes con el fin de ubicar en una imagen los nodos no visibles de la otra imagen. Las características previamente nombradas se observan en la figura 4.5. A continuación se presentan los algoritmos desarrollados para la detección de dichas características.



Figura 4.5: Características a detectar: A)Nodo; B)Ápice; C)Origen; D)Nodo; E)Nodo; F)Origen

4.5 Segmentación por patrones de color

Una de las características principales de la región donde se encuentra el origen de la planta es la hegemonía de la misma en los planos matiz y saturación. Este patrón detectado luego de varias pruebas realizadas en diferentes imágenes, permite establecer un punto de partida para la implementación del método de detección. Teniendo en cuenta el patrón obtenido, se puede establecer que en la mayoría de los casos, el origen del tallo se encuentra en el rango $[200,255]$ de la capa Saturación y en el rango $[0,25]$ para la capa de Matiz. Conocer estos rangos permite segmentar la imagen para separar la región donde se encuentra el origen del resto. En la figura 4.6 se puede observar el resultado de la segmentación.

Una vez obtenida esta imagen, la cual posee puntos blancos y negros, se procede a subdividirla en pequeños rectángulos verticales solapados, con el fin de ubicar por medio de estos, el rectángulo que mayor cantidad de puntos blancos que representa la zona donde se encuentra el tallo de la planta.

Localizado este rectángulo se recorre el mismo, buscando el punto blanco inferior. Este punto es una aproximación del origen.

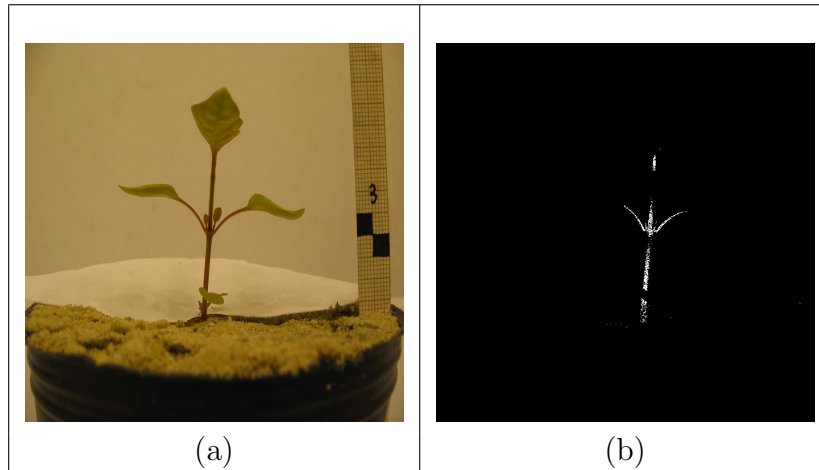


Figura 4.6: (a) Imagen de la planta; (b) Imagen de la planta segmentada en el rango $[200,255]$ de la capa Saturación y en el rango $[0,25]$ para la capa de Matiz.

La técnica de segmentación por patrones de color, permite una elevada separación entre el origen del tallo del resto de la imagen. El origen del tallo se ubica en un rango de H y S que no varía en el tiempo ni de planta en planta. Por el contrario, no se puede definir un patrón de color para la segmentación de las hojas y ramas debido, a que los rangos de H y S varían con el tiempo y de planta en planta.

4.6 Segmentación mediante correlación

Debido al bajo desempeño de la segmentación por patrones de color para las hojas y ramas, se define un método de segmentación orientado a formas, el cual es independiente del color de los elementos a localizar. Los métodos de segmentación orientados a formas, son técnicas que consisten en obtener patrones de las formas de los elementos para lograr la ubicación de los mismos en la totalidad de la imagen. Una de las técnicas más conocidas, es denominada Template Matching, que consiste en comparar determinadas plantillas

semejantes a las formas que se quieren ubicar, sobre distintas regiones de la imagen.

Para implementar esta técnica, se utiliza la correlación entre las plantillas y diversas regiones de la imagen, el cual nos brinda un coeficiente de semejanza para cada una de ellas. La correlación es una operación del procesamiento de imágenes digitales y es considerada la operación básica en los procesos de búsqueda de patrones por emparejamiento (ver sección 2.7). El primer paso para el desarrollo de esta técnica es generar la mayor cantidad de plantillas, las cuales deben ser altamente representativas de las formas que se quieren localizar. El principal objetivo en la utilización de esta técnica, es el de segmentar los elementos de la planta, por lo cual se precisa obtener un modelo de las regiones de la planta en donde se ubicaban dichos elementos.

Un primer acercamiento para la generación de las plantillas es generarlas digitalmente como nuevas imágenes. Las plantillas consisten en rectángulos de diferentes tamaños y rotados en diversos ángulos. Observando los resultados, se puede afirmar que no es una buena opción para la detección de las ramas, ya que las mismas no se asemejan a rectángulos, sino que se encuentran en una forma curvilínea. Por otro lado, estas plantillas conllevan a la obtención de varios falsos positivos, debido a la cantidad de regiones que no pertenecen a las ramas que poseen esta forma rectangular. Sin embargo, este procedimiento funciona para la detección del tallo, dado que su estructura se puede considerar semejante a las plantillas generadas digitalmente. Debido a la irregularidad de las ramas de la planta, tanto en los ángulos con respecto al tallo, como así también en sus longitudes, se crea un conjunto de plantillas que contiene las distintas formas de rama que se encuentran en las imágenes utilizadas para la experimentación de este proyecto. Cada plantilla debe tener un tamaño mínimo necesario para captar la forma, de lo contrario, bajaría el desempeño de este método tanto en cantidad de aciertos como en el tiempo de proceso. Por esta razón, las plantillas se generan realizando cortes de forma manual en regiones específicas de la imagen como se observa en la imagen 4.8.

Una vez obtenido este conjunto, se las binariza y se las guarda para su posterior procesamiento. Antes de realizar el procesamiento, se ubica el origen del tallo previamente detectado, y se corta la imagen delta píxeles hacia la derecha y delta píxeles hacia la izquierda, donde delta depende de la escala previamente calculada en la imagen. Esto nos permite ubicarnos en la zona donde se encuentran las ramas y el tallo, evitando cualquier ruido que pueda provocar el resto de la imagen como así también maximizar el tiempo de respuesta del futuro procesamiento.

La implementación de esta técnica consiste en obtener el coeficiente de

correlación normalizado de la plantilla con la imagen preprocesada. Este valor normalizado, será evaluado sobre un umbral que representa un 85 % de parecido para determinar si la región cumple con las características necesarias. La imagen resultante tendrá valores solo en aquellas porciones donde la plantilla se parezca a la región procesada.

La detección del tallo se obtiene al correlacionar la imagen con máscaras generadas digitalmente que representan diferentes anchos de tallo. La imagen resultante que mayor puntos blancos posea luego de la correlación será la que corresponda a la plantilla que mejor se aproxima a la forma del tallo. Esto permite no solo segmentar el tallo sino también, sabiendo la máscara utilizada poder estimar el ancho aproximado del tallo. El resultado de esta operación se puede observar en la figura 4.7. Finalmente el ápice se aproxima buscando el punto blanco superior en la imagen que posee el tallo segmentado.

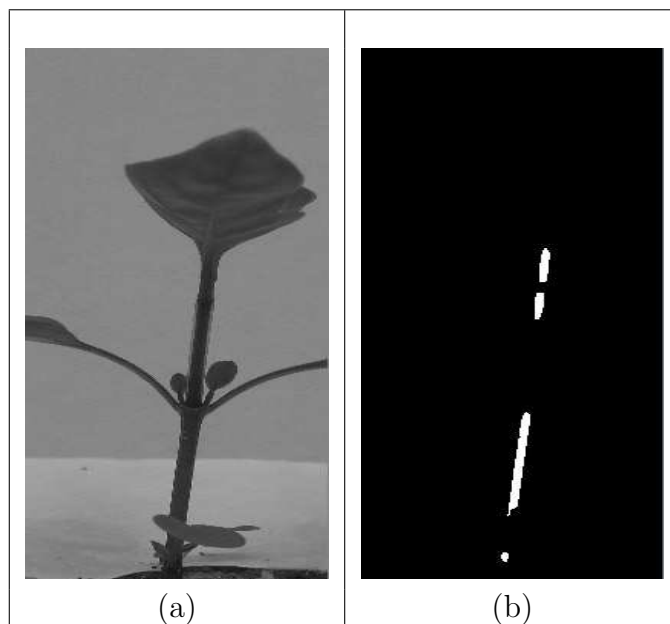


Figura 4.7: (a)Imagen de la planta; (b)Imagen del tallo segmentado.

A diferencia del tallo, para obtener las ramas, la correlación se realiza utilizando plantillas obtenidas mediante cortes en diferentes imágenes. La segmentación de las ramas se logra uniendo los resultados obtenidos de cada una de las correlaciones. Esta etapa tiene un elevado orden de operación, debido a que se calcula la correlación píxel a píxel con cada una de las plantillas. Para mejorar el resultado obtenido se aplica el método de detección de bordes de Sobel, para quedarnos con las líneas que representan las ramas.

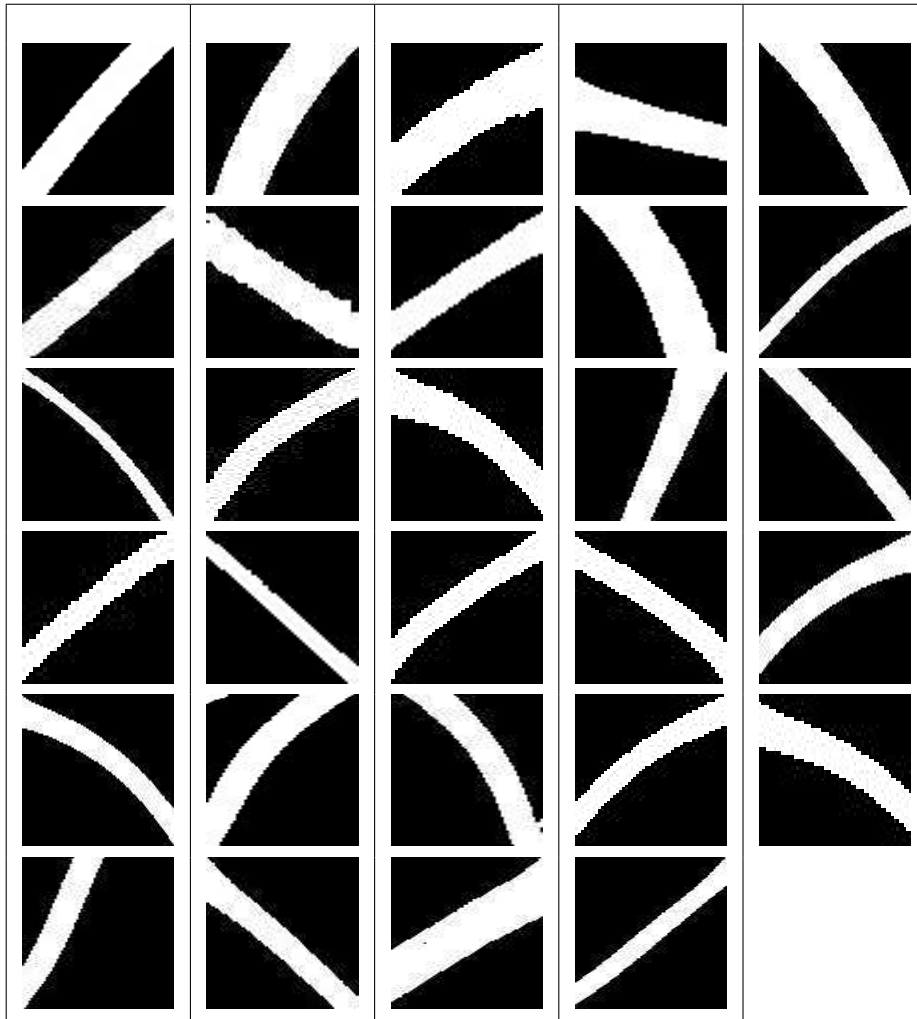


Figura 4.8: Plantillas para la detección de ramas

4.6.1 Aplicación del algoritmo de Hough

Una vez obtenida la imagen segmentada con las ramas separadas del fondo, el objetivo consiste en lograr aproximar las ramas por medio de rectas. Para lograr esto se transforma la imagen desde el espacio x, y al espacio ρ, θ . Una vez realizada la transformación, se filtra la imagen tomando en cuenta los valores que se encuentran en el rango $\theta = [15, 75]$ y $\theta = [105, 165]$, esto se debe a que no se han encontrado ramas que tiendan a ubicarse de manera horizontal ni vertical. Además, se desechan aquellas celdas acumulativas

que posean un valor menor a un umbral previamente definido. Por pruebas experimentales se define el umbral basándose en que una rama estimada, no puede tener menos de un determinado tamaño, todo lo que se encuentre debajo de dicho umbral se considera no deseado. Esta operación da como resultado una nube de puntos por cada posibilidad de aproximación a una rama. Solo se tendrá en cuenta aquel punto que tenga valor mas alto dentro de cada nube. Para obtenerlo, una vez encontrado un valor que supere el umbral se procede a buscar dentro de su vecindad para ρ definido dentro de un rango de $[\rho - 100, \rho + 100]$ y para el dominio de θ previamente analizado. El rango de ρ se establece debido a que dos rectas detectadas deben estar a una distancia mínima una de la otra, porque en las imágenes tomadas no existen ramas pegadas entre si.

En la figura 4.9 se observa la imagen de las ramas transformada al espacio ρ, θ segmentada mediante un umbral previamente definido.

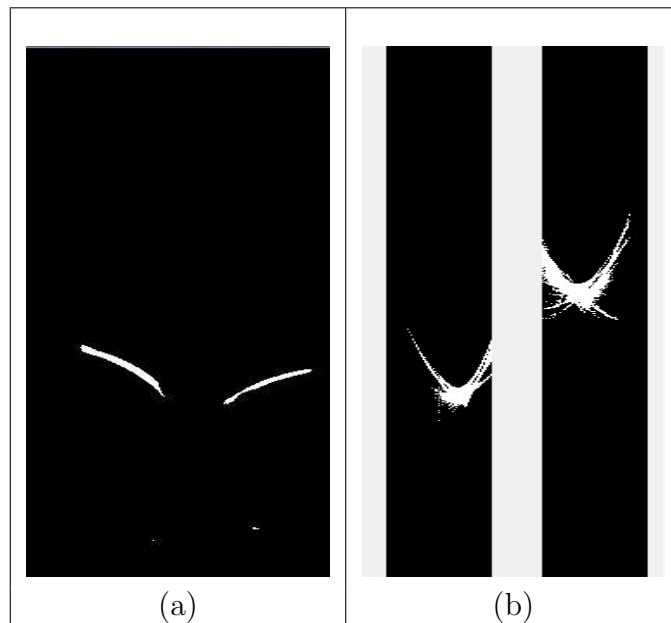


Figura 4.9: (a)Imagen en el espacio x, y ; (b)Imagen transformada al espacio ρ, θ segmentada mediante un umbral previamente definido.

4.6.2 Detección de intersecciones de rectas

Conociendo los parámetros ρ, θ que dan origen a las rectas que aproximan a las ramas, se procede a transformar los mismos al espacio xy (antitransformada de Hough) generando dos imágenes una por cada rango de θ . Adicionalmente para cada punto x, y se almacena el valor de θ , de esta forma se logra conocer el valor del ángulo que forma cada rama con el nodo. La primera imagen representa las rectas que aproximan a las ramas que se ubican a la derecha del tallo y la segunda imagen a las que se ubican a la izquierda. Recorriendo estas imágenes, si se encuentra un valor para un determinado x, y común a ambas, se considerara que las líneas se intersecan en el punto. Para determinar si el punto es común, no solo se verificará la existencia de valor en el mismo punto sino también en el vecindario de este. Obtenidas las intersecciones (x, y) que representan los posibles nodos, se implementa una fase de ajuste que consiste en determinar si las mismas corresponden a un nodo, dependiendo si se encuentran a una determinada distancia preestablecida entre si y a su posición con respecto al tallo. En la figura 4.10 se observan las líneas rectas obtenidas por la antitransformada de Hough que aproximan a las ramas.

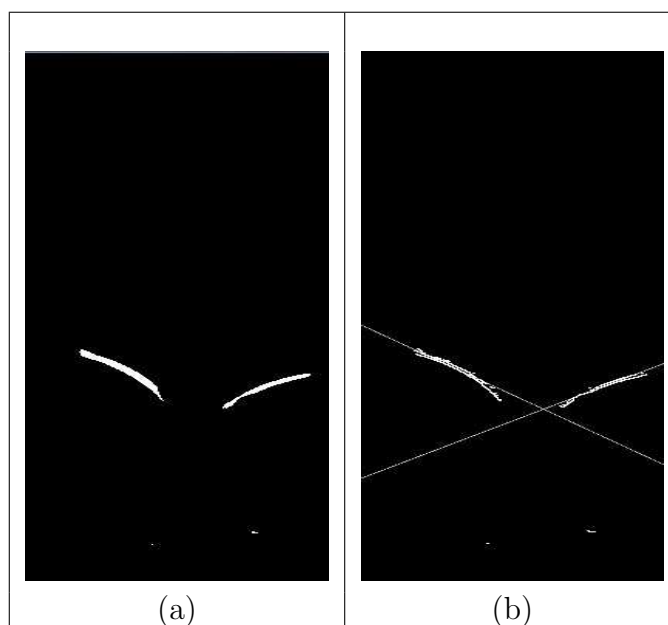


Figura 4.10: (a)Imagen de las ramas segmentadas por medio de correlación; (b)Líneas rectas que aproximan las ramas, obtenidas mediante la antitransformada de Hough.

4.7 Detección de largo y ancho de hoja

La detección del largo y ancho de hoja se logra utilizando información contenida en ambas imágenes (imagen ubicada en la posición 3 e imagen ubicada en posición 6). Por cada nodo detectado, se define una región de interés (ROI) sobre la cual se va a buscar el largo de las hojas y es necesario que ambas hojas estén contenidas en la región. En la figura 4.11 se encuentra la imagen perteneciente a una ROI, correspondiente a un nodo de la planta. La detección del extremo de la hoja derecha se logra barriendo en y , comenzando desde el límite superior de la ROI, y partiendo desde la ubicación del nodo en x más un delta, dependiente de la escala de la imagen que permite evitar el tallo. Se avanza hacia la derecha mientras exista un píxel blanco en el barrido. En el caso de que la ROI contenga el origen, se avanzará de la misma manera mientras que la diferencia de altura entre el píxel actual y el anterior sean menor a un delta (dependiente de la escala de la imagen). El mismo procedimiento pero avanzando en dirección hacia la izquierda nos

permitirá detectar el extremo izquierdo de la hoja.

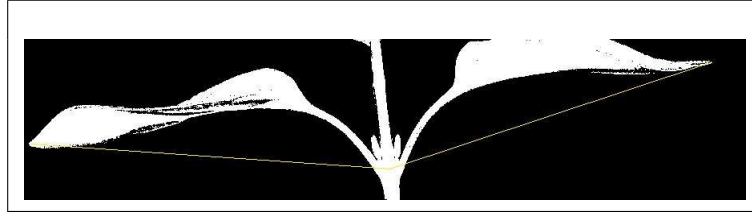


Figura 4.11: ROI que contiene las dos hojas pertenecientes a un nodo de la planta.

Uno de los mayores inconvenientes a la hora de calcular el largo de hoja es que la imagen de la misma no se encuentre en un plano perpendicular al ojo de la cámara. Una solución a este problema consiste en cortar la hoja de la planta y fotografiarla entre dos placas de vidrio y lograr un cálculo más exacto. Sin embargo, esto implicaría que esta rama no vuelva a crecer lo cual impediría continuar con el estudio de la misma en el tiempo. Debido a esto se procede a calcular una aproximación que consiste en la resta del extremo de la hoja con el punto donde se encuentra el nodo.

Una vez calculado el largo de hojas para todos los nodos de cada planta, se procede a calcular los anchos. Esta tarea requiere la utilización de ambas imágenes. Es preciso conocer la posición del nodo en una imagen y mapearla a la posición del mismo en la imagen contraria, ya que este nodo estará oculto para esa vista. Tomando como punto de partida la imagen que contiene a los nodos, se procede a calcular su posición conociendo la escala y la posición del origen en la imagen donde se encuentran obstruidos por la hoja. Este punto se define como “contra nodo”, a partir del cual se define la ROI en la cual se busca el ancho de la hoja. Luego de definir la ROI se procede a calcular el centro de masa, el cual es la suma de cada elemento de masa por la posición de la misma entre la masa total del sistema

$$cm = \frac{\sum_{i=1}^n m_i r_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (4.3)$$

Esta fórmula da como resultado una aproximación del punto medio de la hoja. A partir de dicho punto, el ancho de la hoja se obtiene localizando la posición de blanco que se encuentra más a la izquierda y del blanco que se encuentra más a la derecha, utilizando el método propuesto previamente para la detección del largo de las hojas. La resta de ambos extremos es una

buena aproximación al ancho de la hoja. En la imagen 4.12 se observa una ROI de un nodo calculado en la contra imagen.

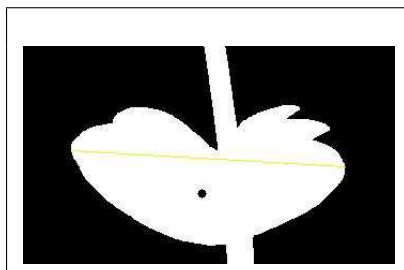


Figura 4.12: ROI de un nodo calculado en la contra imagen.

Experimentación y resultados

5.1 Detección del origen

La detección del origen de tallo, ha sido exitosa en un 90% de las pruebas. Los casos en que el origen no fue detectado de manera adecuada se deben a diversos factores, entre los cuales se pueden mencionar: un ángulo pronunciado de inclinación con respecto al eje y , la existencia de otros elementos de color rojizo en las cercanías del tallo y por último hojas solapando el origen.

La figura 5.1 muestra ejemplos en los cuales la detección del origen ha sido exitosos. A su vez, en la figura 5.2 se observan casos en los cuales el método de detección del origen han fallado.



Figura 5.1: Orígenes detectados satisfactoriamente

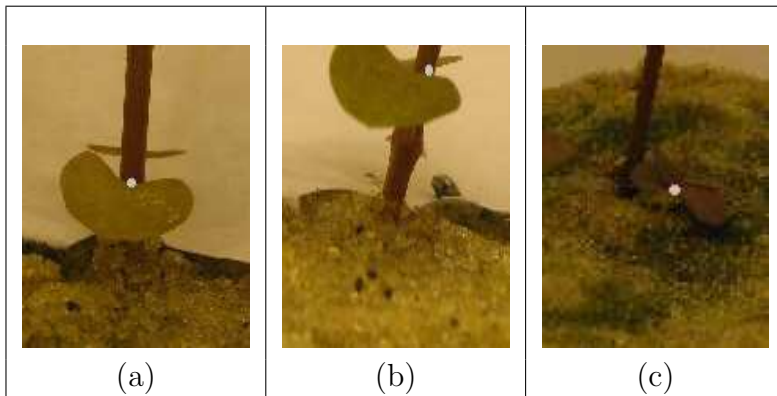


Figura 5.2: (a)Hoja solapando origen; (b)Tallo inclinado; (c)Elementos rojizos

5.2 Detección del tallo y los nodos

Para la detección del tallo se utilizan 3 plantillas que representan diferentes anchos del tallo. El tallo es detectado satisfactoriamente en la totalidad de las imágenes.

Para la detección de las ramas se generan 30 plantillas, las cuales se correlacionan con cada una de las imágenes tomadas para este propósito. El tiempo de procesamiento para cada corrida del método de detección de ramas se aproxima a los 15 minutos por imagen, devolviendo como resultado

una imagen con segmentos de líneas representativas a las ramas de la imagen original.

En la figura 5.3 se observan los resultados de la detección de las ramas, la aplicación de la transformada de Hough para encontrar las líneas rectas que aproximan a las ramas, y por último la detección del tallo.



Figura 5.3: Detección de ramas y tallo sobre 3 imágenes de plantas distintas

Los resultados de estas técnicas, tuvieron buena aceptación en la segmentación de las ramas y tallo del resto de la imagen. Su desventaja se encuentra en que puede detectar como rama, pequeñas regiones de hojas que se asemejan a la forma de las mismas. Cabe destacar, que el buen funcionamiento de esta técnica es dependiente de haber obtenido previamente el origen del tallo, ya que de lo contrario estaríamos errando la ubicación de la imagen donde se realiza la correlación.

Una vez obtenidas las imágenes de ramas segmentadas, se procede a la implementación de un método que nos permita detectar el punto exacto donde se intercecan las mismas, el cual representa un nodo de la planta. La figura 5.4 muestra 5 casos en los cuales el nodo se detectó correctamente. La figura 5.5 muestra 4 casos en los cuales se han detectados falsos positivos que no han sido eliminados en la fase de ajuste.

El método se probó con imágenes que poseían ramas con diferentes ángulos y tamaños. Los mejores resultados se obtienen en plantas pequeñas y que no poseen muchas ramificaciones. Debido a la existencia de rectas que se generaron por elementos que no representan ramas, se detectan falsos nodos, los cuales son eliminados en la fase de ajuste de este proceso.

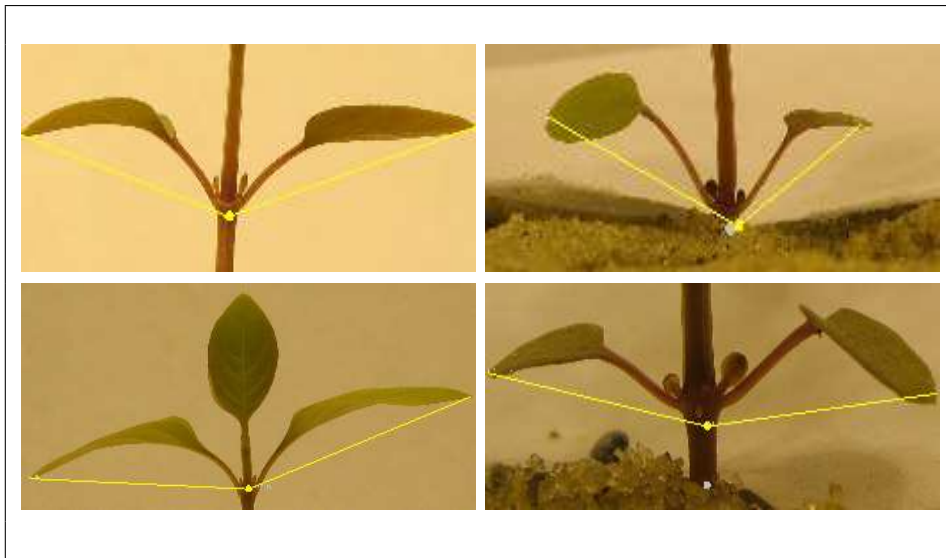


Figura 5.4: Detección de nodo



Figura 5.5: Detección de falsos positivos

La utilización del algoritmo de Hough para la representación de ramas como rectas y localizar el nodo como la intersección de las mismas, es un buen avance en las técnicas de detección de nodos en las plantas.

Dentro de los nodos detectados correctamente, los resultados calculados mediante el sistema poseen un rango de error aproximado de 5mm de diferencia con respecto a los datos medidos manualmente para de plantas de hasta 15 cm.

La tabla 5.1 muestra una comparación de los nodos obtenidos mediante el sistema y los nodos medidos manualmente.

Tabla 5.1: Comparativa de los nodos detectados por el sistema vs los nodos medidos manualmente para una planta en 4 fechas distintas.

| Parámetro | Fecha | Calculado por sistema | Medido manualmente |
|-----------|------------|-----------------------|--------------------|
| Nodo 1 | 11/05/2010 | 2.94 mm | 3 mm |
| Nodo 2 | 11/05/2010 | 15.63 mm | 10 mm |
| Nodo 1 | 15/05/2010 | 2.3 mm | 3 mm |
| Nodo 2 | 15/05/2010 | 11.3 mm | 12 mm |
| Nodo 3 | 15/05/2010 | No detectado | 16 mm |
| Nodo 1 | 18/05/2010 | No detectado | 3 mm |
| Nodo 2 | 18/05/2010 | 12 mm | 13 mm |
| Nodo 3 | 18/05/2010 | No detectado | 16 mm |
| Nodo 1 | 21/05/2010 | No detectado | 3 mm |
| Nodo 2 | 21/05/2010 | 11.8 mm | 13 mm |
| Nodo 3 | 21/05/2010 | 35 | 26 mm |

5.3 Detección de largo y ancho de hojas

Se obtienen buenos resultados en la detección de largo de hojas, en aquellos casos donde el nodo es localizado de manera correcta. El largo de hoja detectado posee una diferencia con respecto a los datos obtenidos manualmente en un rango de 1 a 5 mm para plantas de hasta 20 cm. Cabe aclarar que el cálculo del sistema se realiza mediante una aproximación lineal, mientras que en la toma manual de los datos se utiliza la longitud de arco. Sin embargo, los resultados obtenidos son efectivos a la hora de poder estimar la evolución de la hoja a lo largo del tiempo. Las mediciones de la longitud de hoja fueron correctas, dentro del rango definido previamente, en un 50 % de las imágenes.

La tabla 5.2 muestra una comparación entre las longitudes de hoja detectadas por el sistema y las longitudes de hoja calculadas manualmente.

Tabla 5.2: Comparativa de las longitudes de hojas detectadas por el sistema vs las longitudes de hoja medidas manualmente para una planta en 4 fechas distintas.

| Parámetro | Fecha | Calculado por sistema | Medido manualmente |
|----------------------|------------|-----------------------|--------------------|
| Hoja der. del nodo 1 | 11/05/2010 | 10.4 mm | 10 mm |
| Hoja izq. del nodo 1 | 11/05/2010 | 9.85 mm | 10 mm |
| Hoja der. del nodo 2 | 11/05/2010 | 19.99 mm | 17 mm |
| Hoja izq. del nodo 2 | 11/05/2010 | 20.63 mm | 17 mm |
| Hoja der. del nodo 1 | 15/05/2010 | 11.4 mm | 10 mm |
| Hoja izq. del nodo 1 | 15/05/2010 | 8 mm | 10 mm |
| Hoja der. del nodo 2 | 15/05/2010 | 21.3 mm | 22 mm |
| Hoja izq. del nodo 2 | 15/05/2010 | 20.58 mm | 24 mm |
| Hoja der. del nodo 3 | 15/05/2010 | No detectado | 18 mm |
| Hoja izq. del nodo 3 | 15/05/2010 | No detectado | 18 mm |
| Hoja der. del nodo 1 | 18/05/2010 | No detectado | 10 mm |
| Hoja izq. del nodo 1 | 18/05/2010 | No detectado | 10 mm |
| Hoja der. del nodo 2 | 18/05/2010 | 23.4 mm | 26 mm |
| Hoja izq. del nodo 2 | 18/05/2010 | 22.71 mm | 28 mm |
| Hoja der. del nodo 3 | 18/05/2010 | No detectado | 18 mm |
| Hoja izq. del nodo 3 | 18/05/2010 | No detectado | 18 mm |
| Hoja der. del nodo 1 | 21/05/2010 | No detectado | 10 mm |
| Hoja izq. del nodo 1 | 21/05/2010 | No detectado | 10 mm |
| Hoja der. del nodo 2 | 21/05/2010 | 23.4 mm | 26 mm |
| Hoja izq. del nodo 2 | 21/05/2010 | 22.71 mm | 28 mm |
| Hoja der. del nodo 3 | 21/05/2010 | 36.34 | 39 mm |
| Hoja izq. del nodo 3 | 21/05/2010 | 40.2 | 43 mm |

Los casos en los cuales el método falla son:

1. Las hojas no se encuentran dentro de la ROI.
2. Existen 2 hojas dentro de la misma ROI.
3. El extremo de la hoja se solapa con el suelo 5.6.

Para el primer caso el extremo detectado sera la distancia entre el nodo y el ancho de la ROI. En el segundo caso se genera un falso positivo debido a que puede localizar como extremo de hoja un segmento de una hoja diferente

que este dentro de la ROI y corresponda a otro nodo. Finalmente, para el tercer caso el método no logra distinguir el final de la hoja dado que esta se mezcla con el fondo generando un falso positivo.



Figura 5.6: Error detección largo de hoja

El cálculo del ancho de la hoja es totalmente dependiente de la correcta ubicación del contra nodo. Se observan buenos resultados en este método en el 60% de las imágenes experimentales. Para los anchos de hoja detectados correctamente 5.7, los resultados calculados mediante el sistema poseen un rango de error aproximado de 8 mm de diferencia, para plantas de hasta 20 cm, con respecto a los datos medidos manualmente.

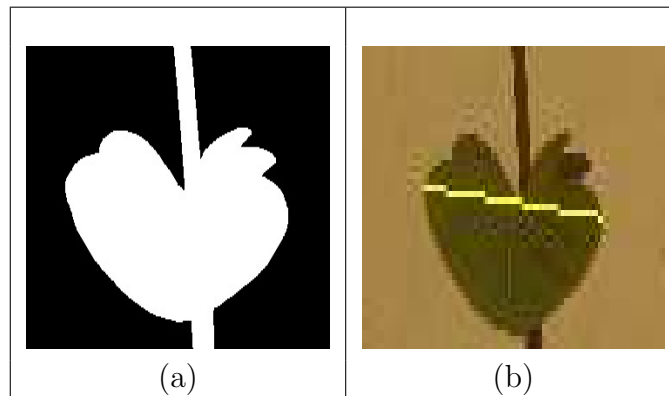


Figura 5.7: (a)ROI centrada en contranodo; (b)Ancho de hoja calculado.

La tabla 5.3 muestra una comparación entre los anchos de hoja detectados por el sistema y los anchos de hoja calculados manualmente.

Tabla 5.3: Comparativa de los anchos de hojas detectados por el sistema vs los anchos de hoja medidos manualmente para una planta en 4 fechas distintas.

| Parámetro | Fecha | Calculado por sistema | Medido manualmente |
|-----------------|------------|-----------------------|--------------------|
| Hoja del nodo 1 | 11/05/2010 | 9.7 mm | 6 mm |
| Hoja del nodo 2 | 11/05/2010 | 18.35 mm | 12 mm |
| Hoja del nodo 1 | 15/05/2010 | 9.7 mm | 6 mm |
| Hoja del nodo 2 | 15/05/2010 | 13 mm | 15 mm |
| Hoja del nodo 3 | 15/05/2010 | No detectado | 13 mm |
| Hoja del nodo 1 | 18/05/2010 | No detectado | 6 mm |
| Hoja del nodo 2 | 18/05/2010 | No detectado | 17 mm |
| Hoja del nodo 3 | 18/05/2010 | No detectado | 20 mm |
| Hoja del nodo 1 | 21/05/2010 | No detectado | 6 mm |
| Hoja del nodo 2 | 21/05/2010 | 21.2 mm | 17 mm |
| Hoja del nodo 3 | 21/05/2010 | 22.8 mm | 24 mm |

Los casos en los cuales el método falla son :

Existencia de 2 hojas en la misma ROI 5.8.

La hoja se encuentra totalmente ubicada a uno de los lados del tallo.



Figura 5.8: Superposición de hojas

5.4 Exportación y persistencia de resultados

Los resultados obtenidos son persistidos en una base de datos y exportados a una planilla excel, la cual sera utilizada por personal de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional del Litoral para ser procesadas por el sistema AMAPMod.

Conclusiones y desarrollos futuros

6.1 Conclusiones finales

En este trabajo se diseñó e implementó una solución software para la tarea de medición de las características de las plantas, con el propósito de automatizar el seguimiento cuantitativo del crecimiento de las mismas. Esta tarea, actualmente desarrollada en forma manual, es de importancia en el área de la arquitectura vegetal.

La detección de características morfológicas de las plantas, no es una tarea fácil de resolver. La variación en forma y color de las mismas a lo largo del tiempo como así también de planta en planta, dificulta la obtención de patrones que permitan dicho objetivo. Por otro lado, los algoritmos de detección de características son dependientes entre si, lo que implica que una mala detección de uno de ellos puede traer aparejado una mala detección del resto. Sin embargo, los resultados obtenidos en la fase de experimentación han sido satisfactorios.

El origen del tallo ha sido detectado en la mayoría de las imágenes utilizando técnicas de segmentación por color, por lo que se la considera una técnica exitosa. La utilización del algoritmo de Hough para la detección de los nodos, como puntos de intersección de las ramas, es un gran avance en el estudio de esta área. Con respecto a la detección de las hojas, el algoritmo

devuelve aceptables resultados en las hojas más lejanas al suelo.

En aquéllos casos donde los resultados obtenidos no fueron satisfactorios, se encuentran las imágenes de plantas grandes, en las cuales las ramas no se pueden identificar favorablemente. Este problema se debe a la falta de correspondencia entre las plantillas y las ramas.

Cabe aclarar, que el sistema desarrollado no es un sistema comercial que trae óptimos resultados en la detección de las características morfológicas, pero podemos afirmar que tanto el protocolo de captura de imágenes como así también los algoritmos presentados en esta tesis, son un primer paso en la resolución del problema. Se han presentado tanto las ventajas como las desventajas de cada uno de ellos, logrando un punto de partida para las futuras investigaciones en este área

6.2 Desarrollos futuros

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el presente trabajo, se procede a mencionar algunas mejoras a los algoritmos desarrollados como así también la incorporación de nuevas funcionalidades aplicables en nuevos desarrollos.

- Mejora en la detección de nodos para plantas de mayor tamaño.
- Detección de la estructura de ramificación que se observan en estados evolutivos avanzados. Esto se puede lograr mediante la aplicación de alguna técnica de recursividad acompañada de una imagen de mejor resolución.
- Implementación de un módulo de simulación para estimar el crecimiento en 3 dimensiones basado en los datos obtenidos.
- Mejora en la obtención de la región de interés utilizada para detectar la ubicación de las hojas, mediante algoritmos de inteligencia artificial.
- Extender la base de plantillas para lograr una mejor aproximación.

Bibliografía

- [1] D. I. Barnea and H. F. Silverman. A class of algorithms for fast digital image registration. *IEEE Trans. Computers*, pages 179–186, 1972.
- [2] F. Bookstein. Morphometrics in evolutionary biology. *Academy of Natural Sciences of Philadelphia. Special Publication 15*, pages 1–277, 1985.
- [3] R. Brunelli and T. Poggio. Face recognition: Features versus Templates. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, pages 1042–1052, 1993.
- [4] A. Burkart. Flora Ilustrada de Entre Ríos. *Colección Científica del INTA. Tomo III*, page 551, 1987.
- [5] K. R. Castleman. Digital Image Processing. *Prentice Hall*, 1996.
- [6] A. Cockburn. Writing Effective Use Cases. *Addison - Wesley*, 2000.
- [7] I. Dellaferrera, J. Acosta, P. Capellino, and A. Amsler. Relevamiento de malezas en cultivos de soja en sistema de siembra directa con glifosato del departamento Las Colonias. *Revista FAVE - Ciencias Agrarias*, 2009.
- [8] R.O. Duda and P.E.Hart. Pattern Classification and Scene Analysis. *IEEE Trans. Computers*, pages 179–186, 1973.
- [9] D Faccini and E. Puricelli. Efecto de la dosis de glifosato sobre la Biomasa de Malezas de Barbecho al Estado Vegetativo y Reproductivo. *Edición INTA 36*, pages 76–78, 2007.

- [10] A. Fournier. Cycle saisonnier de la biomasse et démographie des feuilles de quelques graminées dans les savanes guinéennes de Ouango-Fitini (Côte d'Ivoire). These Doctorat. Université des Sciences et Techniques du Languedoc. *Montpellier*, page 239, 1982.
- [11] E. De La Fuente, S.A. Suárez, C.M. Ghersa, and R.J.C. León. Soybean Weed Communities: Relationship with Cultural History and Crop Yield. *Agron. J.*, pages 234–241, 1999.
- [12] R. C. Gonzalez and R. E. Woods. Digital Image Processing 2nd Edition. *Prentice Hall, New Jersey, second edition*, 2002.
- [13] J.Vitta, L. Faccini, L. Nisensohn, E. Puricelli, D. Tuesca, and Leguizamón. Las malezas en la región sojera núcleo Argentina: Situación actual y perspectivas. *Dow Agro Sciences*, 1999.
- [14] J. C. Papa. Malezas tolerantes a glifosato. *Edición INTA 36*, pages 76–78, 2007.
- [15] W. Pengue. Impactos de la expansión de la soja en Argentina. Globalización, desarrollo agropecuario e ingeniería genética: Un modelo para armar. *Biodiversidad*, pages 7–14, 2001.
- [16] S. R. Pressman. Ingeniería del software. Un enfoque práctico. *Mc Graw Hill, 5 edition*, 1997.
- [17] N. Rodriguez. Malezas con grado de tolerancia al glifosato. Proyecto regional de agricultura sustentable. *INTA- EEA Manfredi*, pages 1–15, 2004.
- [18] J. Storkey. Modeling Seedling growth rates of 18 Temperate Arable Weeds Species as a Function of the Environment and Plant Traits. *Annals of Botany*, pages 681–689, 2004.
- [19] J. Vitta, D. Tuesca, E. Puricelli, L. Nisensohn, D. Faccini, and G. Ferrari. Consideraciones acerca del manejo de malezas en cultivares de soja resistentes a glifosato. *UNR Editora*, 2000.
- [20] D. Woebbecke, G. Meyer, K. Von Bargen, and Mortensen. Color indices for weed identification under various soil, residue, and lighting conditions. *Transactions of the ASAE 38*, page 259269, 1995.
- [21] E.S. Leguizamón y G. Ferrari. Relevamiento de las comunidades de malezas en sistemas de producción de soja bajo siembra directa. Soja en siembra directa. *Rev. Técnica AAPRESID*, pages 124–127, 2005.

Tecnologías utilizadas

A.1 Hibernate:

Es desarrollado en 2001 por Gavin King como una alternativa a EJB2 simplificando la complejidad que esta tecnología poseía. Hibernate ¹ es un motor de persistencia relacional de código abierto, utiliza la licencia LGPL v2.1 y esta basado en las especificación JSR220 y JSR317 para Java. Permite diseñar objetos persistentes que podrán incluir polimorfismo, relaciones, colecciones, y un gran número de tipos de datos.

De una manera muy rápida y optimizada se podrán generar bases de datos en cualquiera de los entornos soportados: Oracle, DB2, MySQL, etc. Facilita el mapeo de atributos entre una base de datos relacional tradicional y el modelo de objetos de una aplicación, mediante archivos declarativos (XML) que permiten establecer estas relaciones. No sólo proporciona mapeo de objetos relacionales básico sino también el resto de funcionalidades sofisticadas que se esperara de una herramienta de mapeo objeto relacional completa, como duplicado de datos, carga perezosa, carga total y duplicado distribuido.

¹<http://www.hibernate.org>

A.2 JExcel:

Java Excel API² es una librería de código abierto que permite a los desarrolladores leer, escribir y modificar hojas de datos Excel de manera dinámica. Cualquier sistema operativo que pueda correr una maquina virtual Java puede procesar y generar hojas de datos Excel. Algunas de las características más importantes de esta librería son:

- Leer datos de las siguientes versiones de Excel 95, 97, 2000, XP y 2003.
- Leer y escribir formulas desde la versión 97 en adelante.
- Soporta fuentes y formateo de números y fechas.
- Soporta sombreado, bordes y coloreado de celdas.
- Permite copiar e insertar imágenes.

A.3 JAI:

La librería Java Advanced Image³ provee un conjunto de interfaces orientadas a objetos que soporta un modelo de programación de alto nivel, el cual permite manipular fácilmente imágenes en aplicaciones Java. Es una librería de alta performance, independiente de la plataforma y extensible. Esta librería posee licencia JSL Java Research License para uso no comercial. Esta licencia permite descargar, compilar y modificar el código fuente para investigaciones sujeto a los términos de la misma.

A.4 Base Datos MySql:

Es un motor de base de datos relacional, esta escrito en C y C++, es multiplataforma y multihilo, permitiendo el acceso de múltiples usuarios. El

²<http://jexcelapi.sourceforge.net>

³<http://java.sun.com/javase/technologies/desktop/media/jai>

servidor MySQL⁴ está diseñado para entornos de producción críticos, con alta carga de trabajo así como para integrarse en software para ser distribuido. Posee dos tipos de licencias comercial y GNU.

A.5 JDK:

(Java Development Kit) ⁵ es un grupo de herramientas para el desarrollo de software provisto por Sun Microsystems, Inc. Incluye las herramientas necesarias para escribir, testear, y depurar aplicaciones y applets desarrollados en Java. Dentro de estas herramientas, podemos mencionar:

- Compilador Java, capaz de generar Byte-Code.
- JVM (“Java Virtual Machine”), capaz de ejecutar Byte-Code.
- Conjunto de Clases base utilizadas para generar programas Java.
- Utilidades para administrar código escrito en Java.

Para este proyecto se utiliza la versión JDK 1.6, ultima versión estable al momento del comienzo del mismo.

⁴<http://www.mysql.com>

⁵<http://www.oracle.com/technetwork/java/javase/downloads/index.html>