



Pontificia Universidad  
**JAVERIANA**  
Cali

# Sistema de Modelado para la reconstrucción 3D del crecimiento de la variedad de arroz Oryza sativa L

Brayan Ricardo Jurado Getial  
Juan Diego Palacios Delgado

Director: Dr. Luis Eduardo Tobón LLano  
Codirector: Dr. Andrés Adolfo Navarro Newball

Pontificia Universidad Javeriana Cali  
Facultad de Ingeniería y Ciencias.  
Ingeniería Electrónica.  
Trabajo de Grado.

Marzo 24 del 2021



Santiago de Cali, Marzo 24 del 2021.

Señores

**Pontificia Universidad Javeriana Cali.**

Dr. Luis Eduardo Tobón LLano

Director Carrera de Ingeniería Electronica

Cali.

Cordial Saludo.

Por medio de la presente me permito informarle que he revisado el proyecto de grado **“Sistema de Modelado para la reconstrucción 3D del crecimiento de la variedad de arroz Oryza sativa L”** de los estudiantes de Ingeniería electrónica Brayan Ricardo Jurado Getial (cod: 8922543) y Juan Diego Palacios Delgado (cod: 8922254) del cual soy director y considero apto para ser presentado y sometido a consideración del jurado. .

Atentamente,



---

Dr. Luis Eduardo Tobón LLano

Santiago de Cali, Marzo 24 del 2021.

Señores

**Pontificia Universidad Javeriana Cali.**

Dr. Luis Eduardo Tobón LLano

Director Carrera de Ingeniería Electronica.

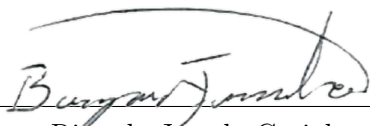
Cali.

Cordial Saludo.

Nos permitimos presentar a su consideración el proyecto de grado titulado “Sistema de Modelado para la reconstrucción 3D del crecimiento de la variedad de arroz Oryza sativa L” con el fin de cumplir con los requisitos exigidos por la Universidad para optar al título de Ingeniero Electronico.

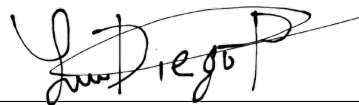
Al firmar aquí, damos fe que entendemos y conocemos las directrices para la presentación de trabajos de grado de la Facultad de Ingeniería y ciencias aprobadas el 26 de Noviembre de 2009, donde se establecen los plazos y normas para el desarrollo del proyecto y del trabajo de grado.

Atentamente,



---

Brayan Ricardo Jurado Getial  
Código: 8922543



---

Juan Diego Palacios Delgado  
Código: 8922254

# Resumen

El estudio del crecimiento de las plantas por medio de modelamiento y reconstrucción ha demostrado ser una herramienta muy importante en los procesos de fitomejoramiento para evaluar la expresión fenotípica de nuevas variedades, además de registrar su crecimiento y funcionamiento.

La arquitectura de la planta de arroz presenta una gran cantidad de macollos y hojas, por lo que estos factores son claves para determinar el rendimiento de una planta. En este trabajo se presenta un sistema de modelamiento 3D del crecimiento de la variedad de arroz *Oryza sativa* L. Cuya finalidad es contribuir al objetivo principal del proyecto P4 de ÓMICAS (plataforma para genotipificación multiescalar de alta resolución), especialmente en el desarrollo de un completo modelado 3D que permita evaluar el potencial de la planta.

El algoritmo de modelado se realizó partir del estudio de variables morfológicas de la planta y del análisis de modelos matemáticos del crecimiento de la planta de arroz y el desarrollo de sus diferentes órganos, de tal manera que se pueda obtener información para evaluar nuevas variedades de arroz, bajo distintas condiciones y a su vez pueda acoplarse con el proyecto de captura de datos morfológicos. El modelo de crecimiento seleccionado esta basado en sistemas L. que se implementó usando los principios de la computación grafica sobre la herramienta OpenAlea.

Como resultado se obtuvo un algoritmo capaz de crear una reconstrucción 3D de la planta usando los datos obtenidos por el grupo encargado de la captura de datos morfológicos, además permite animar el crecimiento de la planta de arroz en su fase vegetativa.

**Palabras Clave:** Fitomejoramiento, Modelamiento de plantas, Reconstrucción vegetal, *Oryza sativa* L, Morfología, Computación gráfica, sistemas L, Pre-procesamiento, OpenAlea, Json, Modelos de crecimiento, Fractales.

# Abstract

The study of plant growth through modeling and reconstruction has proved to be a very important tool in plant breeding processes to evaluate the phenotypic expression of new varieties as well as recording their growth and functioning.

The rice plant's architecture presents many tillers and leaves that are key factors to determine the performance of a plant. In this project, we present a 3D modeling system for the growth of the *Oryza sativa* L rice variety. The purpose of which is to contribute to the main objective of the OMICAS P4 project (platform for high-resolution multiscale genotyping), especially in the development of a complete 3D modeling that allows evaluating the potential of the plant. The modeling algorithm was carried out from the study of morphological variables of the plant, the analysis of mathematical models of the rice plant's growth, and the development of its different organs. In such a way, that information can be obtained to evaluate new varieties of rice, under different conditions and in turn, can be coupled with the morphological data capture project. The selected growth model is based on L systems, which was implemented by using the principles of graphical computation on the OpenAlea tool.

As a result, we obtained an algorithm capable of creating a 3D reconstruction of the plant by using the morphological data that the group in charge of capturing it obtained. Besides, it allows to encourage the growth of the rice plant in its vegetative phase.

**Keywords:** Plant breeding, Plant modeling, Plant reconstruction, *Oryza sativa* L, Morphology, Computer graphics, L systems, Preprocessing, OpenAlea, Json, Growth models, Fractals.

# Índice

<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>1. Marco de Referencias</b>	<b>3</b>
1.1. Marco Teórico . . . . .	3
1.1.1. Morfología del arroz . . . . .	3
1.1.2. Origen del cultivo . . . . .	3
1.1.3. Botánica . . . . .	4
1.1.4. Partes del arroz . . . . .	4
1.1.5. Fenología del arroz . . . . .	13
1.2. Trabajos relacionados . . . . .	18
1.2.1. Modelado 3D de la planta de arroz . . . . .	18
1.2.2. JSON . . . . .	19
1.2.3. Fractales . . . . .	21
1.2.4. OpenAlea . . . . .	22
<b>2. Análisis</b>	<b>23</b>
2.1. Ilustraciones a mano de la planta . . . . .	23
2.2. Características morfológica necesarias para el modelado . . . . .	25
2.2.1. Hojas . . . . .	25
2.2.2. Vaina de la hoja . . . . .	27
2.2.3. Tallo . . . . .	27
2.3. Factores que afectan el crecimiento del arroz . . . . .	28
2.3.1. Temperatura . . . . .	28
2.3.2. Humedad . . . . .	28
2.4. Modelo . . . . .	29
2.4.1. Partes de la planta . . . . .	29
2.4.2. Crecimiento de la planta de arroz . . . . .	37
<b>3. Diseño</b>	<b>41</b>
3.1. Estructura de software . . . . .	41
3.1.1. Módulos del software . . . . .	41
3.1.2. Reglas de crecimiento . . . . .	44
3.2. Estructura de datos . . . . .	45
<b>4. Implementación</b>	<b>49</b>
4.1. Selección de plataforma . . . . .	49
4.1.1. Evaluación de plataformas . . . . .	49

---

4.1.2. Conclusión de la elección . . . . .	53
4.2. Estructura del algoritmo . . . . .	53
4.3. Estructura de las funciones . . . . .	55
4.4. Implementación de color . . . . .	57
4.5. Detalles técnicos . . . . .	58
<b>5. Resultados y Pruebas</b>	<b>60</b>
5.1. Descripción de la aplicación . . . . .	60
5.1.1. Uso del algoritmo . . . . .	60
5.2. Descripción de la pruebas . . . . .	61
5.3. Resultados de las pruebas . . . . .	62
5.3.1. Modelo de las partes de la planta . . . . .	62
5.3.2. Resultados de la animación . . . . .	64
5.3.3. Pruebas de reconstrucción . . . . .	65
5.3.4. Pruebas de modelado . . . . .	66
5.4. Discusión de los resultados . . . . .	75
<b>6. Conclusiones</b>	<b>77</b>
6.1. Conclusiones . . . . .	77
<b>7. Trabajos Futuros</b>	<b>80</b>
7.1. Trabajos futuros . . . . .	80
<b>Bibliografía</b>	<b>81</b>

# Índice de figuras

1.1. Partes Vegetativas de la planta [1] . . . . .	5
1.2. Coleóptilo [2] . . . . .	6
1.3. Estructura del tallo del Arroz [3]. . . . .	6
1.4. Formación de una hoja en el nudo del tallo. . . . .	7
1.5. Macollamiento. . . . .	7
1.6. Prófilo. . . . .	8
1.7. Hoja bandera [3]. . . . .	9
1.8. Componentes de una Hoja de Arroz [2]. . . . .	9
1.9. Lígula y Aurículas de la hoja [3]. . . . .	10
1.10. Panícula de Arroz. . . . .	11
1.11. Clasificaciones de las panículas según el ángulo. . . . .	12
1.12. Raquis y Ramificaciones [2]. . . . .	12
1.13. Estructura de una espiguilla de arroz [2]. . . . .	13
1.14. Relación de las fases fenológicas del arroz, su crecimiento, número de macollos y desarrollo de la semilla [1]. . . . .	14
1.15. Etapas del proceso de germinación. . . . .	15
1.16. Arroz en estado de plántula [2]. . . . .	15
1.17. Planta mostrando el desarrollo del macollo primario y el nacimiento del macollo secundario [2]. . . . .	16
1.18. Planta en la finalización de la etapa de macollamiento. . . . .	16
1.19. Proceso de planta en primordial final. . . . .	17
1.20. Identificación de la etapa de floración. . . . .	17
1.21. Etapa de llenado del grano. . . . .	18
2.1. Ilustración desarrollo de las primeras 4 hojas. . . . .	23
2.2. Ilustración desarrollo de macollos. . . . .	24
2.3. Ilustración desarrollo de la espiga. . . . .	24
2.4. Contorno de la hoja. . . . .	25
2.5. Corte Transversal maíz . . . . .	26
2.6. Ángulo axial. . . . .	26
2.7. Curvatura de las hojas. . . . .	27
2.8. Contorno hoja general. . . . .	29
2.9. Contorno hoja bandera. . . . .	30
2.10. Longitud de la hoja [4]. . . . .	30
2.11. Longitud de la hoja, gráfica obtenida a partir de la información de la Figura 2.4. . . . .	31
2.12. Ancho de las hojas. . . . .	32
2.13. Ancho de las hojas en relación a el largo de las hojas. . . . .	32

2.14. Ancho de la hoja bandera en relación a el largo de las hoja bandera. . . . .	33
2.15. Ángulo Axial tallo principal. . . . .	34
2.16. Ángulo Axial macollos primarios. . . . .	34
2.17. Ángulo Axial macollos secundarios. . . . .	35
2.18. Longitud de la vaina con relación a la longitud de la hoja. . . . .	35
2.19. Fotografía de un nodo. . . . .	36
2.20. Ilustración a mano de un nodo. . . . .	36
2.21. Generalización tallo de la familia Poaceae. . . . .	38
2.22. Esquema de brote de la caña de azúcar. . . . .	39
2.23. Primeras 3 iteraciones de un fractal simple . . . . .	40
3.1. Estructura de módulos que componen el software de modelado 3D del crecimiento de la planta de arroz. . . . .	41
3.2. Diagrama proyecto para P4 ÓMICAS. . . . .	45
3.3. Sintaxis para un Object. . . . .	46
3.4. Sintaxis para un Array . . . . .	47
3.5. Estructura del archivo JSON. . . . .	47
3.6. Lectura del archivo JSON. . . . .	48
4.1. ventana L-Py . . . . .	50
4.2. ventana Visualea. . . . .	52
4.3. Diagrama de flujo del algoritmo. . . . .	54
4.4. Estructura de las funciones en OpenAlea. . . . .	55
4.5. Cilindro creado con una función básica de OpenAlea. . . . .	56
4.6. Figura producto de la función sweep. . . . .	57
4.7. Mapa de colores en OpenAlea. . . . .	57
4.8. Resultado de la aplicación del mapa de colores. . . . .	58
4.9. Textura de tierra. . . . .	58
5.1. Ventana del algoritmo. . . . .	60
5.2. Curvas de Bézier usadas para el modelo de la lamina de las hojas. . . . .	62
5.3. Modelo de las hojas. . . . .	62
5.4. Comparación del modelo de nodo con imagen de un nodo real. . . . .	63
5.5. Modelo de tallo. . . . .	63
5.6. Simulación de las primeras etapas. . . . .	64
5.7. Simulación etapas de macollamiento. . . . .	65
5.8. Prueba 1 reconstrucción de planta de arroz. . . . .	66
5.9. Resultado Prueba 2. . . . .	67
5.10. Resultado Prueba 3. . . . .	68
5.11. Resultados Prueba 4. . . . .	69
5.12. Resultados Prueba 5. . . . .	70
5.13. Resultados Prueba 6. . . . .	71

---

5.14. Resultados Prueba 7. . . . .	72
5.15. Resultados Prueba 8. . . . .	73
5.16. Resultados Prueba 9. . . . .	74
5.17. Resultados Prueba 10. . . . .	75

# Índice de cuadros

1.1. División de las fases fenológicas del arroz. . . . .	14
5.1. Condiciones y resultados de la prueba 1. . . . .	67
5.2. Condiciones y resultados de la prueba 2. . . . .	67
5.3. Condiciones y resultados de la prueba 3. . . . .	68
5.4. Condiciones y resultados de la prueba 4. . . . .	69
5.5. Condiciones y resultados de la prueba 5. . . . .	70
5.6. Condiciones y resultados de la prueba 6. . . . .	71
5.7. Condiciones y resultados de la prueba 7. . . . .	72
5.8. Condiciones y resultados de la prueba 8. . . . .	73
5.9. Condiciones y resultados de la prueba 9. . . . .	74
5.10. Condiciones y resultados de la prueba 10. . . . .	75

# Introducción

Se prevé que el crecimiento de la población mundial se duplicará durante los primeros 45 años del siglo XXI. Como consecuencia, la producción de alimento tendrá que triplicarse, obligando a un incremento en la productividad agrícola. Además de la imperativa necesidad por lograr seguridad alimentaria, los estreses bióticos y abióticos han alterado la sostenibilidad productiva de los cultivos (en algunos casos de manera crítica, ej. variaciones climáticas que afectan la supervivencia de algunos cultivos, como el cacao; el contenido de metales en suelos que afectan el desarrollo normal de cualquier cultivo y comprometen su uso para consumo humano; o las emisiones no deseadas de gases invernadero en cultivos esenciales, como el arroz, son algunos ejemplos) [5].

El Plan Estratégico Colombiano para la Ciencia, la Tecnología y la Innovación del Sector Agropecuario (PECTIA) enfatiza entonces la necesidad de apostar por estrategias holísticas y convergentes desde la investigación. En este contexto, la generación de nuevas variedades de cultivos con mayor rendimiento y calidad es una estrategia necesaria y de alto impacto para la agricultura. Como se observó en la revolución verde para los cereales, esta estrategia puede ser motor de desarrollo para la agricultura si se realiza combinando el acceso a recursos genéticos y nuevas tecnologías [5].

Una revolución verde en Colombia debe generar variedades que incrementen la productividad y competitividad, mejoren la seguridad alimentaria y promuevan el desarrollo de sistemas ambientalmente sostenibles [5].

La agricultura es un sector de alta importancia y se estima que la demanda mundial de alimentos crecerá considerablemente en el futuro, según estudios realizados en el 2015 por TechnoServe, se estima que para el 2050 la demanda global de alimentos crecerá un 70 %. Esto debido al crecimiento de la población mundial y al aumento de consumo alimentario per cápita[6]. En términos de valor la producción agrícola colombiana tan solo ha crecido en un 2.1 % anualmente durante los últimos 10 años [7]. Colombia cuenta con una baja productividad en muchos de los sectores y el sector agrícola es uno de los menos productivos.

El objetivo de la propuesta es diseñar, implementar, validar y transferir soluciones científico- tecnológicas para mejorar la seguridad alimentaria y la sostenibilidad ambiental de los sistemas productivos agrícolas a partir de la generación de variedades que toleran limitantes bióticas y abióticas, y demostrar la sostenibilidad productiva de los mismos por medio de prácticas agrícolas encaminadas a reducir las emisiones de gases invernadero y la degradación de suelos [5].

En particular, el trabajo de grado esta encaminado a realizar un aporte a la mejora de cultivos a través de datos morfológicos y de la arquitectura de la planta que serán obtenidos con la implementación de un sistema de captura de imágenes, especialmente de la planta de arroz en diferentes etapas del crecimiento de ésta.

Para el desarrollo del proyecto, primero se realizó una investigación acerca de trabajos afines al proyecto de modelamiento (1.2), se hizo un estudio de la morfología del arroz y posteriormente un análisis (1.1.1), de esta manera se determinaron las variables que afectan su crecimiento y como lo hacen, en las diferentes etapas de crecimiento (2.3). Después de realizado el análisis, se obtuvieron las reglas de crecimiento (3.1.2). Para la implementación de las reglas de crecimiento se realizó la selección de la plataforma en la que se implementó el algoritmo de modelado, para este proyecto se decidió utilizar OpenAlea con su conjunto de librerías y módulos especializados en la caracterización y simulación de plantas (4.1). Con esta potente herramienta y la adaptación de un modelo de crecimiento basado en sistemas L (2.4), se creó un algoritmo capaz de realizar animaciones 3D del crecimiento de la planta de arroz (5).

# Marco de Referencias

---

## 1.1. Marco Teórico

### 1.1.1. Morfología del arroz

El arroz se considera una entidad vegetal de alta variabilidad genética, que está representada por muchas especies y miles de formas cultivadas. Todas son el resultado de los procesos naturales de evolución y de las continuas modificaciones que el hombre ha logrado en la especie vegetal original, sometiéndolo a múltiples cruces artificiales y a procesos biotecnológicos. Debido a la gran variedad de especies es difícil establecer características morfológicas generales, por lo tanto, se han clasificado en distintas secciones [8]:

- **Sección Sativa:** abarca las especies cultivadas y la mayoría de las especies silvestres.
- **Sección Granulata:** se encuentra solamente en el sudeste de Asia y todas sus especies son perennes.
- **Sección Coarctata Roschev:** está distribuida en diferentes partes del mundo y cuyas especies son, casi todas, perennes.
- **Sección Rhynchoryza Roschev:** cuyas especies tienen un tipo de planta diferente al de las especies de otras secciones.

Dos especies de arroz se cultivan actualmente en Latinoamérica: *Oryza sativa* L, que es de origen asiático y que es la variedad más cultivada en Colombia, y el más consumido en todo el mundo. También se lo conoce como arroz blanco. La segunda especie es *Oryza glaberrima* Steud, de origen africano, y que solo se encuentra en el oeste de África. Por ello la expansión del cultivo se debe a la primera especie [8].

### 1.1.2. Origen del cultivo

Aunque el origen del arroz es incierto, varios autores aceptan que *Oryza sativa* L procede del sudeste de Asia, de una región cercana a la parte sur de India, o sea, de la antigua Cochinchina (región meridional de la península de Indochina), donde las condiciones ambientales son favorables para este cultivo y hay gran cantidad de especies silvestres del género *Oryza*. Se admite que el arroz se propagó desde el sudeste asiático y el sur de India hasta China, en una época aún no establecida pero que se calcula transcurrió más de 3000 años AC. Este cereal fue llevado de China a Corea y de

este país, o desde China, fue introducido en Japón, al parecer en el siglo I AC. Después continua su expansión por todo el continente asiático y por consiguiente al mundo [8].

### 1.1.3. Botánica

La denominación botánica de la planta de arroz que se trabajara en el proyecto es *Oriza Sativa* L. En la especie indicada se consideran tres grupos o tipos de arroz: índica, japónica y javánica o bulú. Su origen estaría en la selección hecha, bajo diferentes ambientes, del arroz silvestre en los procesos de domesticación [8].

- **Tipo Indica** : se cultivan en los trópicos, tienen las siguientes características: mayor altura que otras variedades, macollamiento denso, hojas largas e inclinadas de color verde pálido, y grano de mediano a largo. Estos granos tienen un contenido de amilosa entre medio y alto que les da un aspecto seco y blando, y los hace poco aptos para desintegrarse en la cocción. Los trabajos de mejoramiento han producido variedades de arroz de tipo índica que tienen estatura corta, macollamiento abundante, respuesta al nitrógeno y que dan un rendimiento tan alto como las de tipo japónica [8].
- **Tipo Japónica**: tienen hojas erectas de color verde intenso y una capacidad de macollamiento menor que la de las variedades de tipo índica; tienen mayor respuesta al nitrógeno (medida en rendimiento) que éstas, son insensibles al fotoperíodo y toleran las bajas temperaturas. Sus granos son cortos y anchos y su contenido de amilosa, que es bajo, los hace pegajosos y con tendencia a desintegrarse en la cocción [8].
- **Tipo Javánica o Bulú**: son morfológicamente similares a las del tipo japónica, pero sus hojas son más anchas y pubescentes, emiten pocas macollas, y la planta es fuerte y rígida. Estas variedades son insensibles al fotoperíodo y sus granos son aristados [8].

El conocimiento de la planta de arroz (*Oryza sativa* L), en particular de su morfología, es esencial para el proyecto, porque en él se basan tanto la diferenciación de las variedades, como los estudios de fisiología y de mejoramiento. Se describirán aquí la forma y la estructura de los principales órganos de la planta, tanto vegetativos (radícula, tallo, hojas) como reproductores (flor y semilla). Debido al enfoque del proyecto, se considerará un estudio morfológico más profundo en los apartados de tallos y hojas. En este tipo de especie gramínea anual, se destacan los tallos (cilíndricos y huecos, con nudos y entrenudos), las hojas de lámina plana y angosta, unidas al tallo mediante vainas, y la inflorescencia en panícula. La planta puede medir desde 0.4 m (variedad enana) hasta 7 m (variedad flotante)[8].

### 1.1.4. Partes del arroz

#### Órganos vegetativos

En la Figura 1.1, se pueden observar las diferentes partes vegetativas de la planta en las que se profundizara en el transcurso del capítulo.

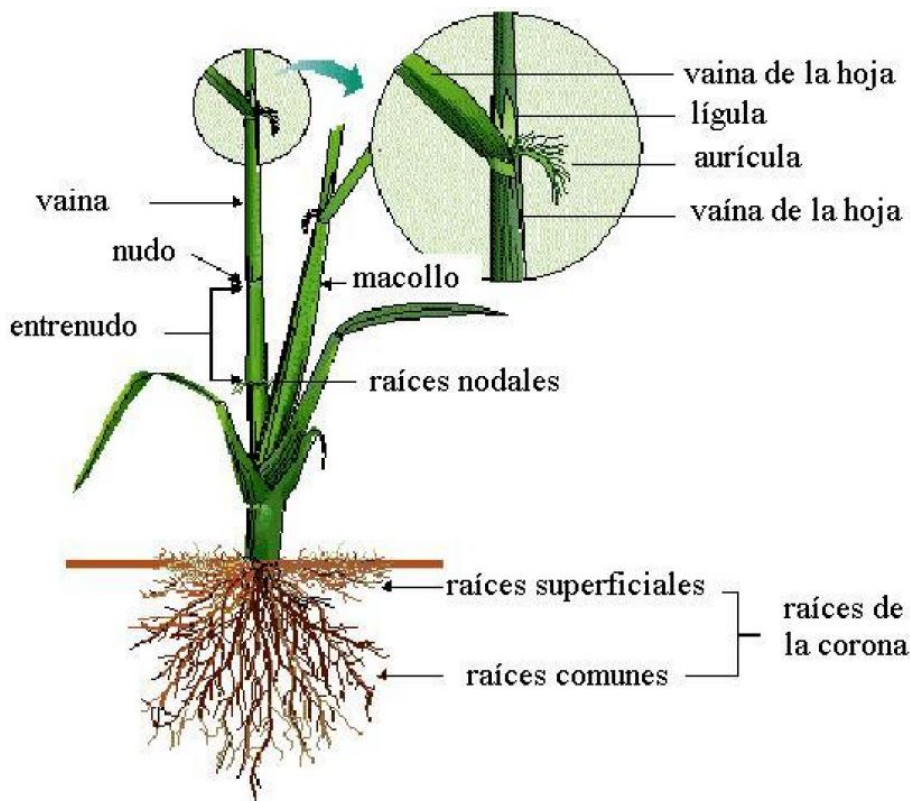


Figura 1.1: Partes Vegetativas de la planta [1]

**Radícula** : Durante su desarrollo, la planta de arroz emite dos clases de raíces: las seminales (o temporales) y las adventicias (o permanentes). Se denominan también primarias y secundarias, respectivamente. Las raíces seminales son poco ramificadas, viven un corto tiempo después de la germinación, y son reemplazadas por las raíces adventicias las cuales brotan de los nudos subterráneos de los tallos jóvenes; en el arroz flotante brotan de los nudos del tallo que está sumergido en el agua y, en algunos casos, también de los nudos aéreos. No se enfatiza mucho en la raíz de la planta debido a que es un apartado en el cual en este proyecto no se lo va a considerar, sin embargo, consideramos pertinente mencionarlo en la morfología de la planta de arroz [8].

**Coleóptilo y mesocotilo** : El coleóptilo es una estructura que emerge directamente desde la semilla hacia arriba, es el primer parte de la planta que sale del suelo, es la encargada de abrir el pazo al resto de la planta por lo que al alcanzar una altura entre 1.0 cm a 2.5 deja de crecer y da paso a la primer y segunda hoja, como se muestra en la Figura 1.2 [8].

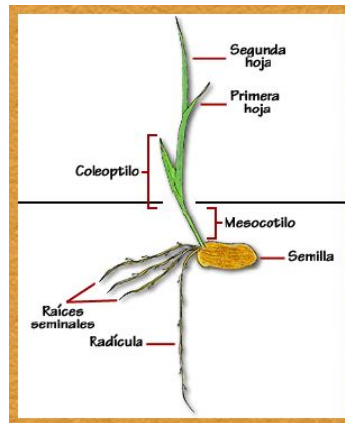


Figura 1.2: Coleóptilo [2]

**Tallo** : El tallo está formado por una alternación de nudos y entrenudos como se muestra en la Figura 1.3.

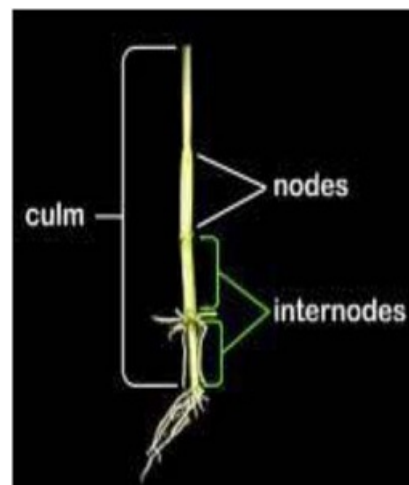


Figura 1.3: Estructura del tallo del Arroz [3].

Los tallos de la variedad de arroz *Oryza sativa* L tienen una longitud entre 40cm y 150 cm, el tallo principal es erecto y tiene forma cilíndrica. Los internodos más cercanos al tallo son más cortos, teniendo una mayor longitud conforme se ubiquen en una sección de mayor altura en el tallo. El tallo se va engrosando hasta alcanzar una sección sólida en el primer nudo, después empieza a angostarse, por lo que los internodos superiores tendrán un menor grosor que los nodos inferiores. En el nudo o región nodal, se forman las hojas como se muestra en la Figura 1.4, también puede desarrollarse una yema que puede desarrollarse o convertirse en un macollo [8].



Figura 1.4: Formación de una hoja en el nudo del tallo.

Un tallo con sus hojas forma una macolla. Estas se desarrollan en orden alterno en el tallo principal. Las macollas primarias se desarrollan de los nudos más bajos, a la vez producen macollas secundarias; y estas últimas producen macollas terciarias. El conjunto de macollas y el tallo principal forman la planta. El número total de macollas es una característica varietal, que puede variar según el sistema de cultivo y el medio ambiente. En la Figura 1.5 se evidencia claramente los procesos de macollamiento, con rojo se representa el macollamiento primario y con amarillo está representado el macollamiento secundario [8].



Figura 1.5: Macollamiento.

Otro factor muy importante para considerar, son los ángulos que se forman al momento de aparecer los hijos secundarios y terciarios, respecto al eje del tallo principal, los cuales dará lugar a las siguientes ramificaciones [8]:

- Erecta, con un ángulo menor que 30.
- Abierta, con un ángulo cercano a los 60.
- Dispersa, con un ángulo mayor que 60.
- Procumbente, con un ángulo de 90; por tanto, un hijo formado en nudos inferiores del tallo principal tiende a yacer sobre la superficie del agua o del suelo.

Es cierto que el número total de hijos por planta es una característica que puede variar según el sistema del cultivo y el medio ambiente, por ende, para el proyecto se debe asumir [8].

**Hojas** : Las hojas de la planta de arroz se distribuyen en forma alterna a un lado y a otro a lo largo del tallo. La primera hoja se denomina prófalo la cual no tiene lámina y está constituida por dos brácteas aquilladas. Los bordes del prófalo se adhieren al dorso de los hijos jóvenes para asegurarlos al tallo. La representación de la primera hoja la podemos ver en la Figura 1.6.

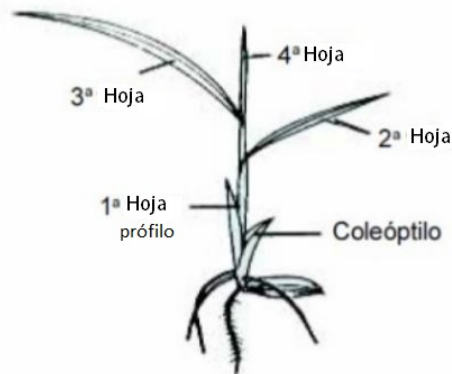


Figura 1.6: Prófilo.

En cada nudo, con excepción del nudo de la panícula, se desarrolla una hoja. La última hoja que nace en el tallo se encuentra debajo de la panícula y es conocida como la hoja bandera. La lámina de la hoja bandera es más corta y ancha que la de las hojas anteriores a ella. Según la variedad de arroz, forma un ángulo diferente con el tallo y adopta cuatro posiciones: erecta, intermedia, horizontal o descendente. En la Figura 1.7 se tiene una representación de una hoja bandera en una posición erecta [8].



Figura 1.7: Hoja bandera [3].

En una hoja completa se distinguen tres partes principales: la vaina, el cuello y la lámina:

- **Vaina:** o base de la hoja, sale de un nudo y envuelve el entrenudo inmediatamente superior llegando, en algunos casos, hasta el nudo siguiente, así como se muestra en la Figura 1.8.

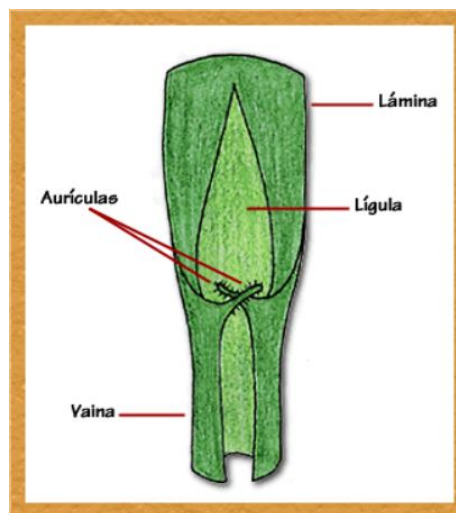


Figura 1.8: Componentes de una Hoja de Arroz [2].

- **Pulvínulo de la vaina:** es una protuberancia situada más arriba del punto de unión de la vaina con el tallo, puede tener cierto parecido con el nudo, pero es algo que se debe diferenciar [8].
- **Cuello:** es la unión de la vaina y la lámina, en él se encuentran la lígula y las aurículas:

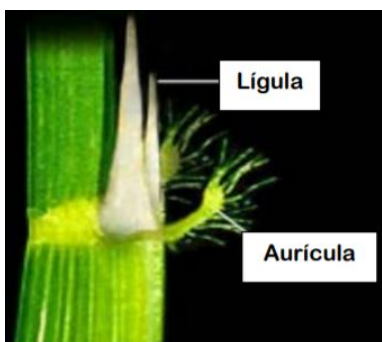


Figura 1.9: Lígula y Aurículas de la hoja [3].

- **La lígula:** es una estructura triangular membranosa, situada en el interior del cuello y ligada a la vaina, puede diferir en tamaño, color y forma, según la variedad de arroz [8].
  - **Las aurículas:** son dos partes del cuello, generalmente alargadas en forma de hoz, las cuales abrazan el tallo. En su parte convexa tienen un tejido en forma de dientes pequeños tal y como se muestra en la Figura 1.9 [8].
- **Lámina de la hoja:** es de tipo lineal, de punta aguda, larga y más o menos angosta, según las variedades. En la cara superior, sobresalen las venas paralelas que conforman el sistema vascular. A lo largo de la cara inferior, corre por el centro una nervadura prominente; sobre ella, en ciertos casos, se enrolla la lámina [8].

## Órganos reproductores

Los órganos reproductores no se consideraron para modelar en el proyecto, ya que se requiere de un modelo distinto al de los órganos vegetativos. De igual manera se hará una presentación de la morfología de este apartado, completando así la morfología de la planta de arroz.

**Panícula** : Es un conjunto de flores reunidas o una inflorescencia compuesta. En la panícula se encuentran el raquis o eje principal, las ramificaciones primaria y secundaria del raquis, las espiguillas, las flores(floreillas) y las semillas. La panícula está ubicada sobre el nudo extremo del tallo, el cual es llamado nudo ciliar o base de la panícula, tiene generalmente la forma de un arco. En el nudo ciliar no se forma hoja ni yema de hijo, pero en él puede originarse la primera ramificación de la panícula y, según el caso, otras tres ramificaciones. Este nudo se toma como punto de referencia para medir la longitud del tallo y de la panícula. El entrenudo superior del tallo, en cuyo extremo se encuentra la panícula, se denomina pedúnculo. A continuación, en la Figura 1.10 se presenta la estructura de la panícula [8].



Figura 1.10: Panícula de Arroz.

Después de la floración, la aparición de la panícula respecto al cuello de la hoja bandera se clasifica así:

- **Emergencia completa:** en que la base de la panícula sale completamente de la vaina de la hoja bandera y queda distante del cuello de ésta.
- **Emergencia semicompleta:** en que la base de la panícula está un poco más arriba del cuello de la hoja bandera.
- **Emergencia normal:** en que la base de la panícula coincide con el cuello de la hoja bandera.
- **Emergencia parcial:** en que la base de la panícula queda debajo del cuello de la hoja bandera.
- **Emergencia nula:** en que la panícula no emerge y queda encerrada dentro de la vaina de la hoja bandera.

Según el ángulo que formen las ramificaciones de las panículas al salir del eje, también se pueden clasificar como abiertas(B), cerradas(C) o intermedias(A), en la Figura 1.11 se puede dimensionar esta clasificación.

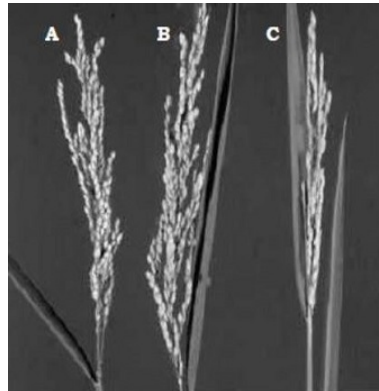


Figura 1.11: Clasificaciones de las panículas según el ángulo.

**Raquis** : En cada nudo del raquis o eje principal nacen, individualmente o por parejas, ramificaciones que, a su vez, dan origen a ramificaciones secundarias (Figura 1.12 ), de las cuales brotan las espiguillas. Estas ramificaciones secundarias se presentan en diferentes densidades, por ello se puede clasificar en las siguientes secciones [8]:

- **Ausentes:** cuando no hay ramificaciones secundarias.
- **Escasas:** cuando hay pocas ramificaciones secundarias.
- **Intermedias:** cuando hay muchas ramificaciones secundarias, a veces varias por cada ramificación primaria.
- **Abundantes:** cuando las espiguillas brotan en grupos sobre las ramificaciones secundarias.

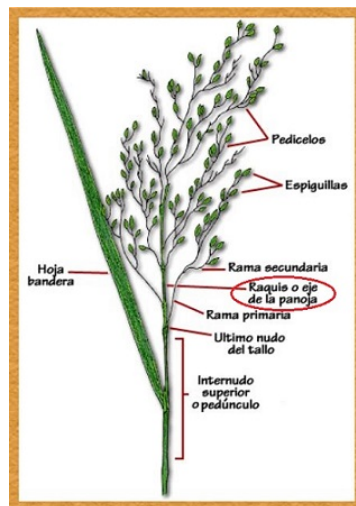


Figura 1.12: Raquis y Ramificaciones [2].

**Espiguilla** Es la unidad de la inflorescencia, está unida a la ramificación por el pedicelo. Las espiguillas del género *Oryza* contienen tres flores o florecillas, de las cuales una sola se desarrolla y es fértil. Una espiguilla consta de la raquilla, las florecillas y dos lemmas estériles. Así como se lo puede mirar en la Figura 1.13. Las lemmas estériles, llamadas glumas rudimentarias, son dos brácteas que se alargan desde el pedicelo. La raquilla es el eje que sostiene la florecilla; las lemmas estériles rodean la raquilla por debajo. En la espiguilla se encuentran además dos brácteas superiores, llamadas glumas florales o simplemente glumas [8]:

- **Lemma:** tiene forma de bote y presenta cinco nervaduras.
- **Pálea:** que tiene tres nervaduras y ocupa la posición opuesta a la Lemma.

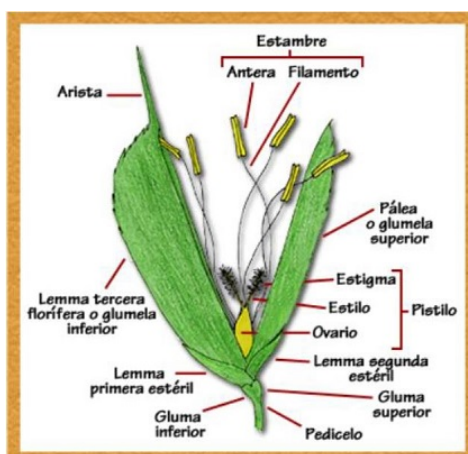


Figura 1.13: Estructura de una espiguilla de arroz [2].

### 1.1.5. Fenología del arroz

El arroz presenta un desarrollo fenológico dividido en dos fases; la fase vegetal o vegetativa y la fase reproductiva, la primera comprende 3 etapas: germinación, plántula y mancollamientos. Mientras que la segunda comprende las etapas de primordio final, floración y maduración [9]. A su vez para cada etapa existe una serie de procesos que la definen, la enumeración de los procesos depende del estándar que se empleó, en la Tabla 1.1 se muestra la información de etapas fenológicas de la planta y la codificación respecto al estándar BBCH. Los tiempos presentados son para una planta de arroz *Oryza sativa* L de tiempo de crecimiento de 120 días [1].

<i>Fases</i>	Fase Vegetal			Fase Reproductiva		
<b>Etapas</b>	Germinacion	Plántula	Macollamiento	Primordio final	Floracion	Maduración
<b>Duración</b>	4 días	11 días	45 días	20 días	10 días	30 días
<b>Tiempo desde la siembra</b>	4 días	15 días	60 días	90 días		120 días
<b>Codigo BBCH</b>	00 - 13	16 - 19	20 - 30	33 - 59	61 - 69	70 - 99

Cuadro 1.1: División de las fases fenológicas del arroz.

Las etapas de la planta de arroz están divididas principalmente por el número de hojas y macollos que la planta presenta. Por lo que el tiempo de duración de una etapa varía respecto a las condiciones de siembra, a la variedad y a factor climáticos [1]. El tamaño del arroz se detiene al iniciar la etapa reproductiva, mientras que el número de macollos efectivos se detiene al finalizar la etapa vegetativa como se muestra en la Figura 1.14.

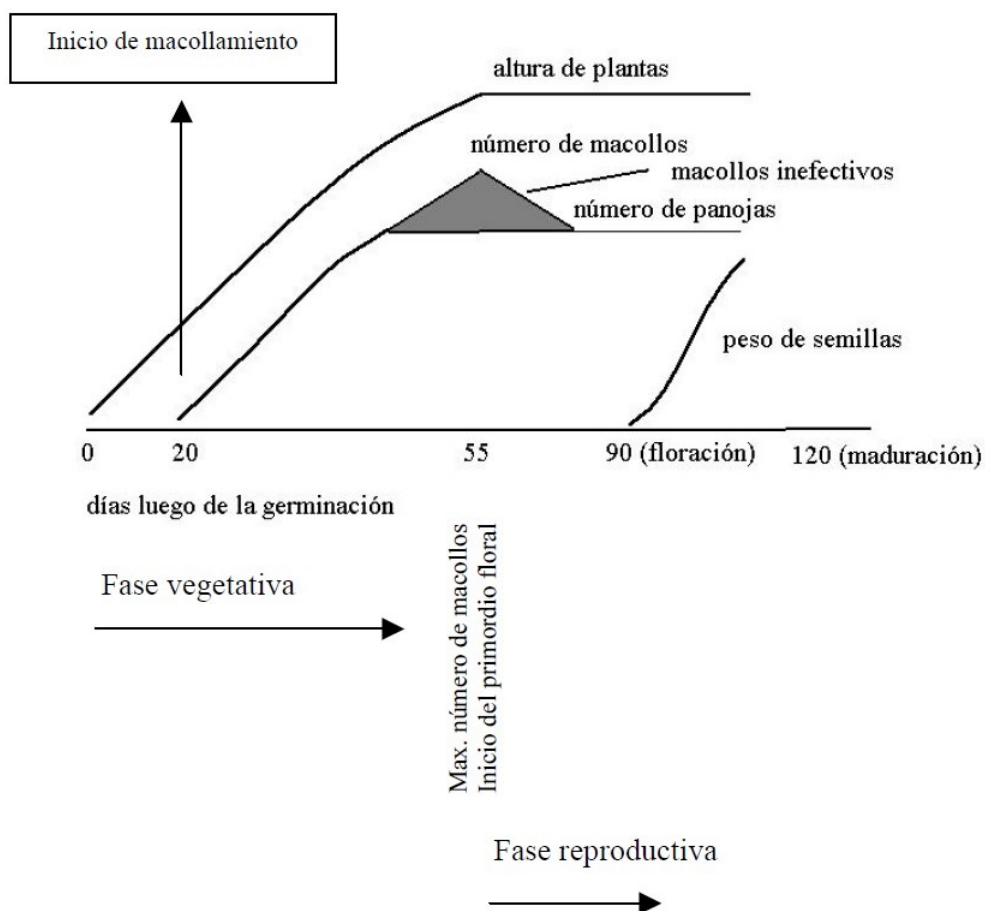


Figura 1.14: Relación de las fases fenológicas del arroz, su crecimiento, número de macollos y desarrollo de la semilla [1].

## Fase Vegetativa

**Germinación** se da alrededor de los primeros 4 días después de la plantación del arroz (para una variedad con un crecimiento de 120 días), a una temperatura entre 20 -40C, optima 30C - 35C [1].

La germinación se da cuando el coleóptilo emerge de la cariósida (piel protectora de la semilla del arroz). El coleóptilo empieza a abrirse paso hasta emerger a la superficie y tras alcanzar no más de 2 cm de altura detiene su crecimiento y da paso a la primer y segunda hoja [1].

Este proceso se puede observar en la Figura 1.15.

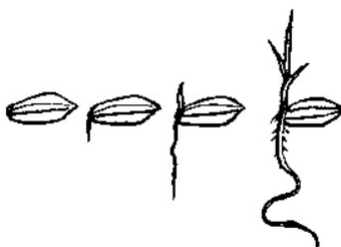


Figura 1.15: Etapas del proceso de germinación.

**Plántula** El estado de plántula va hasta la aparición de la cuarta hoja. El tamaño que la planta tenga en esta etapa depende del modo de siembra empleado, específicamente, la altura del agua ya que el estado de plántula va hasta que la planta de arroz sobrepasa la altura del agua y empieza a crecer por fotosíntesis [9]. En esta etapa aun no aparecen nudos en la planta y no se inicia el proceso de engrosamiento del tallo, como se puede detallar en la Figura 1.16.

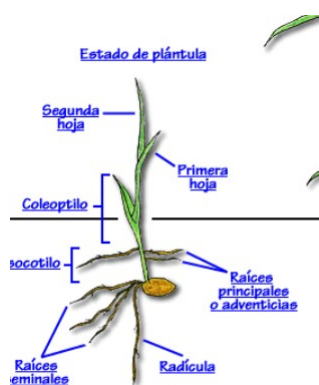


Figura 1.16: Arroz en estado de plántula [2].

**Macollamiento** La etapa de macollamiento se desarrolla a partir de la quinta hoja. Se inicia con la aparición de un macollo que crece en la yema axilar, comúnmente ubicado en el primer o segundo nudo en la sección sólida en la base de la planta [9], como se observa en la Figura 1.17.

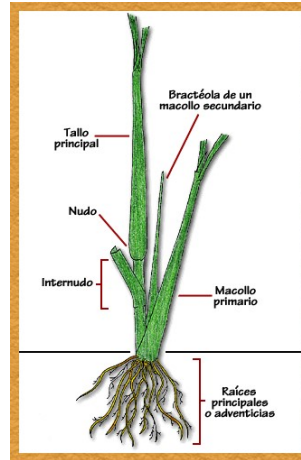


Figura 1.17: Planta mostrando el desarrollo del macollo primario y el nacimiento del macollo secundario [2].

Posteriormente a partir de los siguientes nudos o subnudos continúan apareciendo macollos primarios, estos producen macollos secundarios e incluso pueden desarrollarse macollos terciarios [9].

La etapa de macollamiento es de rápido crecimiento vegetativo y al final de esta etapa se obtiene la cantidad máxima de macollos obteniendo como resultado una planta similar a la de la Figura 1.18.



Figura 1.18: Planta en la finalización de la etapa de macollamiento.

## Fase Reproductiva

**Primordio final** Las hojas bandera u hojas superiores empiezan el proceso de desembuchamiento, en esta etapa la panoja empieza a asomarse y posteriormente empieza a granularse hasta que la hoja bandera se abre por completo y la panoja se muestra como una elongación granulada en la parte superior de la planta, en esta etapa el nudo del cuello coincide con la aurícula de la hoja bandera [9]. Este proceso se describe en la Figura 1.19 .

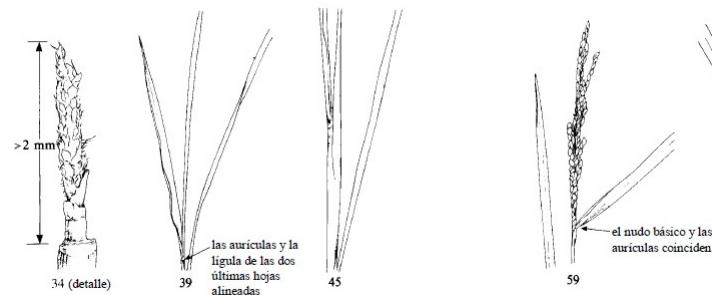


Figura 1.19: Proceso de planta en primordio final.

**Floración** La etapa de floración inicia justo después de que se desarrolle la primer panícula, como se puede observar en la figura 1.14, y se desarrolla al tiempo con la etapa de macollamiento. La flor o espiguilla se desarrolla en la parte superior de la panoja y se fertiliza durante la etapa de maduración de la panícula [9]. Como se observa en la Figura 1.20.

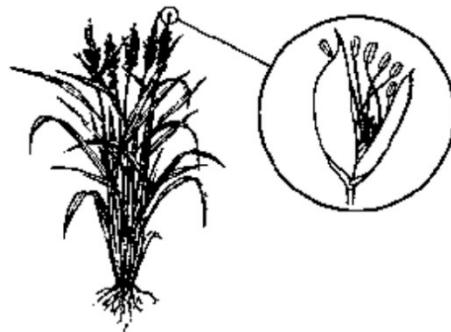


Figura 1.20: Identificación de la etapa de floración.

**Maduración** El grano pasa de un estado acuoso y de manera progresiva va pasando a un estado lechoso, pasando de una masa blanda a una masa dura, logrando así la madurez fisiológica. El grano va ganando volumen y la espiga se empieza a abrir y a tomar forma arqueada debido a su base delgada, como se muestra en la Figura 1.21 [9].

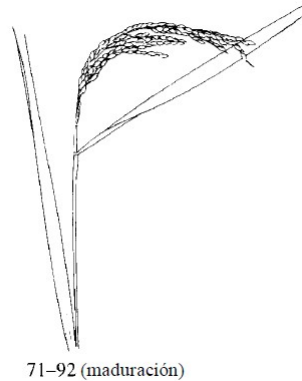


Figura 1.21: Etapa de llenado del grano.

## 1.2. Trabajos relacionados

Para este proyecto se tiene como objetivo principal realizar el modelado de crecimiento de la planta de arroz. Para su desarrollo fue necesario conocimiento acerca de la morfología de la planta, de igual manera es necesaria la información obtenida a partir de ideas; desarrollos; modelos o sistemas ya existentes, como es el caso de los sistemas L, a los que Campos Muñoz define como: “una gramática formal de derivación paralela, un conjunto de reglas y símbolos principalmente utilizados para modelar el proceso de crecimiento de las plantas, aunque también puede modelar la morfología de una gran variedad de organismos [10]. Es un modelo muy eficiente cuando se trata de modelar descripciones de tipo fractales. Con la ayuda de los sistemas L se han desarrollado proyectos orientados a la modelación del crecimiento de las plantas, por lo tanto, se ha recolectado información sobre investigadores que han trabajado en la temática que desarrollaremos en el proyecto.

### 1.2.1. Modelado 3D de la planta de arroz

En el artículo de Tomonari Watanabe et al.[4], en 2005 desarrollan un proyecto enfocado en la medición, especificación y reconstrucción del desarrollo estructural mediante modelado arquitectónico. Para este proyecto, se utilizaron plantas de arroz sembradas al aire libre, cuyas condiciones fueron monitorizadas usando una estación meteorología. De igual manera, se realizaron registros diarios de las nuevas hojas y mocollos en la planta, para su digitalización fueron llevadas a un ambiente de laboratorio para evitar perturbaciones por el viento, después se realiza el respectivo análisis de los datos. Las coordenadas recopiladas fueron procesadas por medio de software, de esta manera se calculan las longitudes y orientaciones. Para la posterior modelación estos resultados de los análisis se expresan como especificaciones o reglas de la morfología de la planta utilizando sistemas L, los cuales producen una cadena de símbolos en cada paso de tiempo que luego se usa las

reglas de "Homomorfismo" para traducir la cadena en una forma visual con gráficos en 3D. Como resultados obtenidos se tiene un modelo de arroz en 3D, el cual tiene un aspecto fenológico que brinda información acerca del momento de la emergencia de la hoja. Sin embargo, el proyecto está en una etapa primitiva, no se pueden caracterizar diferencias entre variedades o respuestas a interacciones ambientales y biológica

En el artículo se muestra el proceso completo para lograr la medición y reconstrucción 3D de plantas de arroz *Oryza sativa*. La investigación se divide en tres partes, en primer lugar, se describe la morfología y el desarrollo arquitectónico de la planta de arroz, posteriormente se muestra el proceso de medición realizada de manera manual, finalmente se lleva a cabo todo el proceso de reconstrucción 3D.

Para la reconstrucción 3D se crearon reglas de producción de los diferentes órganos de la planta, haciendo uso de la sintaxis de los sistemas L, estas reglas son el resultado de los estudios de la morfogénesis y la arquitectura del arroz junto con el proceso de medición llevado a cabo en la segunda parte del artículo.

Este artículo ha sido muy importante para el proyecto debido a que presenta información de los diferentes órganos de la planta de arroz, así como también un análisis del desarrollo de estos ya que muestra todo el proceso llevado a cabo y muestra la importancia de conocer muy bien la morfología de la planta para poder hacer una reconstrucción de la misma.

Entre las principales similitudes con el proyecto que se desarrollo en este trabajo de grado se encuentra el proceso, ya que la etapa inicial que se llevo a cabo para lograr el modelado 3D del crecimiento de la planta, fue dedicado a la investigación de la morfología de la variedad de arroz. Además de la toma de mediciones a la planta, en este caso estas mediciones se reciben a través de un archivo .JSON por parte del grupo encargado del proyecto "Sistema de captura de datos morfológicos mediante análisis de imágenes durante el crecimiento de plantas de arroz" desarrollado por los estudiantes de ingeniería electrónica Wilmer Andrés Arteaga Melo y John Sebastián Basante Benavides. Finalmente con todo esto se crearon reglas de crecimiento basadas en sistemas L.

### 1.2.2. JSON

Una de las herramientas utilizadas en el proyecto de modelado es JSON (notación de objeto de JavaScript), con el fin de obtener los datos recolectados en la fase uno del proyecto (Fase de captura de los datos morfológicos). Para entender su funcionamiento, principales características y ventajas para el proyecto se leen algunos artículos relacionados:

Peñas Javier y Reyero Laura para el año de 2012 realizaron un proyecto basado en JSON: JLOP (Json language oriented processing). El artículo aborda un problema de sistemas informáticos, más específicamente, en el procesamiento de los documentos JSON. El objetivo de este proyecto es generar un programa que procese documentos JSON de una manera determinada, aplicando una o varias funciones al mismo, que deberán ser previamente especificadas. Aparte de incluir las principales características de JSON, en el artículo también se encuentran algunas comparaciones de JSON

con formatos similares, como XML y otros lenguajes de marcado [11].

JSON es un formato ligero de intercambio de datos, independiente del lenguaje de programación, lo que quiere decir que en las plataformas que se está utilizando para el proyecto (fase uno y dos), se puede utilizar el formato JSON, y de esta manera lograr conexión en las dos fases. JSON también tiene forma de texto plano, de simple lectura, escritura y generación. Debido a la simplicidad, no es necesario que se construyan parsers (Un analizador sintáctico: es un programa informático que analiza una cadena de símbolos de acuerdo con las reglas de una gramática formal.) personalizados [11]. Entre sus características principales son:

- Independiente de un lenguaje específico.
- Basado en texto.
- De formato ligero.
- Fácil de parsear.
- No define funciones.
- No tiene estructuras invisibles.
- No tiene validador.
- No es extensible.
- Es autodescriptivo y fácil de entender.
- Es ligero (bytes) en las transmisiones.
- Velocidad de procesamiento alta.
- Puede ser entendido de forma nativa por los analizadores de JavaScript.

Para la organización de datos en el proyecto, se utiliza Arrays, los cuales son una colección ordenada de valores u objetos. Empieza con un corchete izquierdo y termina con un corchete derecho. Los valores se separan con comas. En el transcurso del documento se podrá evidenciar mejor la estructura de este [11].

### **Desventajas de JSON**

- No cuenta con una característica que posee XML: extensibilidad.
- No soporta grandes cargas, solo datos comunes.
- Para la seguridad requiere de mecanismos externos como expresiones regulares.

Estas desventajas no son muy relevantes en nuestro proyecto, debido a que utilizamos cargas pequeñas de datos en la fase de captura y datos ya definidos, por lo que tampoco requiere expansibilidad.

### 1.2.3. Fractales

Campos Daniel para el año 2011 realiza un artículo enfocado en los sistemas L: introducción a los sistemas de Lindenmayer donde se tratan temas relacionados a fractales, autómatas celulares y aplicaciones.

En el artículo se presenta información del creador de los sistemas L, Aristid Lindenmayer. Las primeras aplicaciones fueron enfocadas hacia las estructuras vegetales. Esto debido al potencial que estos sistemas presentan. Un sistema-L es un lenguaje, una gramática formal de derivación paralela, un conjunto de reglas y símbolos principalmente utilizados para modelar el proceso de crecimiento de las plantas, aunque también puede modelar la morfología de una gran variedad de organismos[12].

En el artículo se puede evidenciar los elementos de un sistema-L, también son conocidos como sistemas-L paramétricos<sup>3</sup>, definidos como un conjunto:

$$G = \{V, S, w, P\}$$

Donde:

- **V:** El alfabeto, es un conjunto de símbolos que pueden ser reemplazados (variables o símbolos no terminales) y se utilizan para componer cadenas.
- **S:** Es un conjunto de símbolos que se mantienen fijos (constantes o símbolos terminales).
- **w:** El axioma, es la cadena que describe al sistema en su estado inicial, formada por uno o mas símbolos de V.
- **P:** Reglas de producción, son las transformaciones que se aplican al axioma y, sucesivamente, a las cadenas generadas. Definen la forma en la que las variables pueden ser reemplazadas por combinaciones de constantes y otras variables. Las reglas de producción generan cadenas formadas únicamente por los símbolos del alfabeto por lo tanto, todas las cadenas pertenecerán al lenguaje definido por el sistema-L [12].

Una consideración importante es que las reglas de producción se aplican simultáneamente a todos los símbolos de la cadena de entrada, sea ésta el axioma o las cadenas resultantes de cada derivación. Esta propiedad refleja el origen biológico de los sistemas-L, ya que los organismos vivos crecen simultáneamente en todas sus partes y no secuencialmente. Cabe señalar que, en cada iteración, la estructura del sistema aumenta su complejidad por lo que hay que ser cuidadosos en derivar demasiadas veces al sistema [12].

El artículo sirvió para entender la gramática general de los sistemas L, para de esta manera aplicarlos en el modelado de la planta de Arroz. Para generar el sistema L que se aproxime al desarrollo de la planta de Arroz. Se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Observar el desarrollo de los organismos o del sistema en general que se quiera modelar. En este caso una estructura vegetal (*Oryza sativa* L)

- Identificar los distintos elementos que interactúan.
- Identificar las normas de desarrollo o producción de cada elemento.
- Considerar características externas, influencia del entorno, competencia por sobrevivir, recursos disponibles.

Los sistemas de Lindenmayer son una herramienta muy poderosa, tienen una gran capacidad expresiva en la simulación de procesos e interacciones, lo que representa algunas ventajas sobre la experimentación tradicional, por ejemplo, ahorro de tiempo y dinero porque el desarrollo normal de muchos sistemas puede tardar años; se pueden repetir las veces que se considere necesarias hasta estar satisfecho con los resultados, cosa que en la realidad es muy difícil hacer [12].

#### 1.2.4. OpenAlea

OpenAlea es la plataforma seleccionada para el modelado de la planta de arroz, para entrar un poco en contexto de esta herramienta se mostrará a continuación un par de artículos correspondiente al proyecto OpenAlea:

Boudon Frédéric, desde el año 2006 se ha dedicado a la implementación y difusión del software OpenAlea que es un proyecto de código abierto dirigido principalmente a la comunidad de investigación de plantas. Es un esfuerzo colaborativo distribuido para desarrollar bibliotecas y herramientas de Python que abordan las necesidades de los trabajos actuales y futuros en el modelado de Arquitectura de plantas. Incluye módulos para analizar, visualizar y modelar el funcionamiento y el crecimiento de la arquitectura de la planta. Fue desarrollado formalmente en el equipo de Inria VirtualPlants. La arquitectura del sistema se basa en el uso de un lenguaje de script orientado a objetos, de alto nivel y de propósito general, Python, ampliamente utilizado en otras áreas científicas [13].

Boudon Frédéric, para 2012 publicó un documento de investigación denominado "L-Py: un marco de simulación del sistema L" para la planta de modelado desarrollo de arquitectura basado en un lenguaje dinámico. En este documento, se presenta una adaptación de los sistemas L al lenguaje Python, un lenguaje dinámico de licencia abierta popular y potente, se muestra que el uso de propiedades dinámicas del lenguaje hace posible mejorar los modelos del crecimiento de la planta [14]. El documento se lo puede considerar como un tutorial inicial, en el que se comienza con ejemplos sencillos hasta unos más avanzados, para de esta manera entender y practicar con cada uno de los módulos (L-py, Visualea, gnuplot) presentes en la plataforma OpenAlea. En el transcurso del documento se especificarán los detalles de cada uno de estos módulos.

Una parte importante para el éxito del modelado de una planta es tener conocimiento de sus características anatómicas y morfológicas de la planta, para este proyecto es fundamental este conocimiento ya que con este se pueden definir que partes de la planta son de especial interés para el desarrollo del modelo, que variables se deben tener en cuenta en las diferentes etapas de crecimiento que se van a modelar, que factores pueden afectar la apariencia de la planta y de que manera. Toda esta información es fundamental para definir la estructura del algoritmo, que información es necesaria recibir por parte del proyecto “Sistema de captura de datos morfológicos mediante análisis de imágenes durante el crecimiento de plantas de arroz”.

## 2.1. Ilustraciones a mano de la planta

Con el fin de tener una mejor comprensión acerca de la anatomía de las diferentes partes del arroz, la forma en la que crecen y las etapas en las que se hacen visibles se realizaron ilustraciones a mano de la planta de arroz en las diferentes etapas de crecimiento. Los dibujos se hicieron en base a la información obtenida en la sección 1.1.1 y en fotos obtenidas en internet. En la Figura 2.1 se puede observar el crecimiento de la planta de arroz desde la aparición del coleóptilo hasta que ya se ha desarrollado su cuarta hoja, estas ilustraciones permiten comprender el crecimiento de la planta en sus primeras etapas, además con esto se puede saber que datos son necesarios para lograr modelar esta primera parte del crecimiento de la planta.

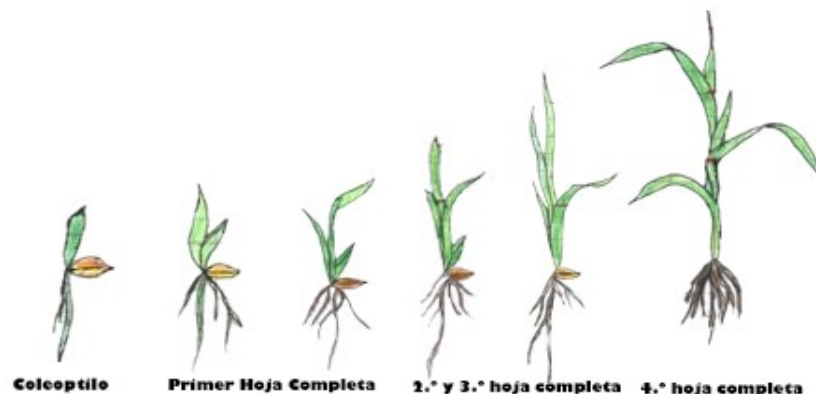


Figura 2.1: Ilustración desarrollo de las primeras 4 hojas.

Para el proceso de macollamiento se realizaron las ilustraciones que se pueden observar en la Figura 2.2, en estas ilustraciones se puede notar el nacimiento de los primeros macollos, además, permite conocer un poco mas acerca de la estructura del tallo, la distribución de nodos, internodos y hojas.



Figura 2.2: Ilustración desarrollo de macollos.

Para las últimas etapas de crecimiento de la planta de arroz, se realizaron las ilustraciones de la Figura 2.3 donde se puede observar el crecimiento de los macollos y el tallo, también se puede observar la disposición de las hojas y la aparición de la espiga.



Figura 2.3: Ilustración desarrollo de la espiga.

## 2.2. Características morfológica necesarias para el modelado

Debido a que no se planea modelar las partes de la planta que crecen por debajo de la tierra ni algunos de sus órganos como el caso de la panícula, flores y sus espigas, se ha determinado que las partes de la planta que se van a incluir dentro de la animación son, las hojas, la vaina de las hojas y el tallo, que incluye los nodos y los internodos.

### 2.2.1. Hojas

Para reconstruir la anatomía en 3D de la hoja es necesario conocer el contorno de las hojas que se observa en la Figura 2.4. Es importante conocer las variables que afectan la forma de las hojas, si depende de la posición nodal de la hoja o hay diferentes tipos de hojas.

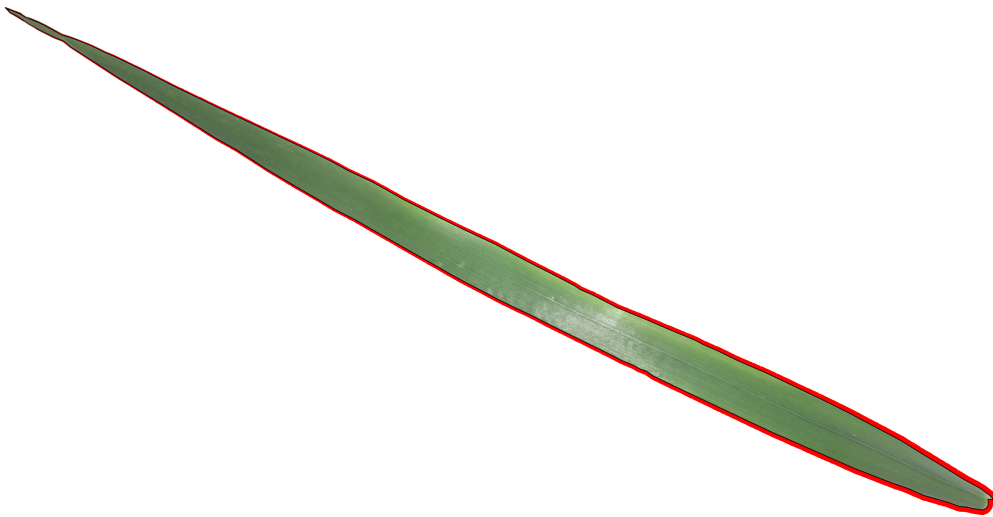


Figura 2.4: Contorno de la hoja.

También es necesario, la forma del corte transversal de la hoja, que se observa marcada en rojo en la Figura 2.5 donde se observa el corte transversal de una hoja de maíz. Al igual que con el contorno es necesario conocer los posibles cambios que puede tener esta característica y bajo que condiciones se dan.



Figura 2.5: Corte Transversal maíz

El largo y ancho de la lámina foliar de la hoja completamente expandidas es otro de los datos necesarios, de la misma manera es importante conocer el ángulo axial que la hoja forma con el tallo, que está marcado de color rojo en la Figura 2.6.



Figura 2.6: Ángulo axial.

También es importante conocer la forma que la hoja toma al crecer como se observa en la Figura 2.7.



Figura 2.7: Curvatura de las hojas.

### 2.2.2. Vaina de la hoja

Para modelar la vaina de la hoja es importante conocer su largo y ancho y como varían a medida que la planta crece, así como conocer su ubicación.

Para la animación se debe determinar en que momento empieza a crecer.

### 2.2.3. Tallo

Es importante recordar que el tallo tiene dos partes, los nodos y los internodos como se observa en la Figura 1.3, por lo que entre las variables que se deben tener en cuenta están la distribución de estos a lo largo del tallo, su forma, longitud y grosor. Para el modelo del tallo se debe tener en cuenta el largo, el número de nodos y la longitud de cada internodo, teniendo en cuenta que los internodos de la base son mas cortos y gruesos que los nodos de la parte superior de la planta.

Para los macollos se debe tener en cuenta su tamaño, el tiempo en que salen y los ángulos que forman con el suelo.

## 2.3. Factores que afectan el crecimiento del arroz

De acuerdo con la guía para identificar las limitaciones de campo en la producción de arroz, de la comisión internacional del arroz organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación, factores como la temperatura, la radiación y los niveles de agua afectan el crecimiento del arroz [15].

### 2.3.1. Temperatura

Las altas o bajas temperaturas afectan el crecimiento de la planta de arroz, ya que inciden en el macollaje, a las hojas, puede demorar algunos procesos [15].

**Bajas temperaturas** Las bajas temperaturas limitan la tasa de crecimiento y el desarrollo de la planta. A continuación se enumeran algunos efectos de las bajas temperaturas [15].

- Si la temperatura durante la etapa de germinación es menor a 10 C, se presenta una inhibición en la germinación.
- Si la temperatura está entre 12 C y 13 C se presenta una demora en la emergencia de la plántula.
- Se presenta decoloración en las hojas y raquitismo si la temperatura esta entre 7C y 12C.
- Temperaturas entre 9 C y 16 C causan reducción en el macollamiento.

**Altas temperaturas** Las altas temperaturas causan estrés térmico sobre las plantas de arroz. Algunos de los efectos de las altas temperaturas son [15]:

- En temperaturas mayores a los 45C las hojas presentan un color blanco en la punta, bandas cloróticas y manchas.
- El macollamiento a temperaturas mayores a los 35C es reducido.

### 2.3.2. Humedad

Los niveles de humedad de suelo son esenciales para tener un adecuado manejo de nutrientes, tanto el exceso como el déficit de agua afectan el crecimiento y el rendimiento de la plata de arroz [15].

**Déficit de agua en el suelo** Entre los síntomas más comunes del déficit de agua sobre el crecimiento y el rendimiento están:

- Las hojas pueden padecer enrollamiento y resequedad.
- Macollamiento limitado.
- Se reduce la altura de la planta.

## 2.4. Modelo

Para el modelado 3D de la planta de arroz es necesario tener un modelo de las características descritas en la Sección 2.2 que permita recrear la arquitectura cada parte de la planta y el crecimiento de esta.

### 2.4.1. Partes de la planta

#### Hojas de la planta de arroz.

**Forma de las hojas** En la investigación realizada por Watanabe et. al. [4] se determino que la forma del contorno de la hoja era la misma en todas las hojas, excepto en las hojas banderas, por lo que es necesario tener el contorno de las hojas bandera y de las demás hojas. En la Figura 2.8 se puede observar la forma de las hojas de la planta de arroz obtenidas en [4].



Figura 2.8: Contorno hoja general.

De la misma manera en la Figura 2.9 se puede observar la forma de la hoja bandera obtenida en [4].

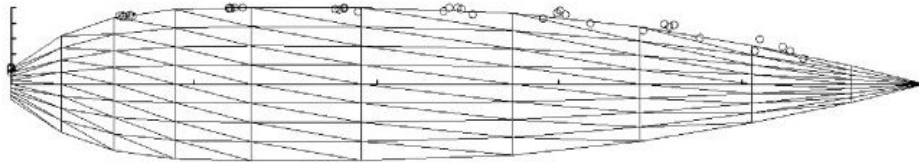


Figura 2.9: Contorno hoja bandera.

**Largo de las hojas** Para conseguir una función que permita obtener el largo de las hojas, se usó la gráfica de la Figura 2.10, encontrada en [4]. La gráfica muestra la longitud de las laminas de la hoja completamente expandidas (en milímetro) respecto a su posición nodal, como en la figura 2.4, del tallo principal (M) y de los macollos primarios (numerados del 2 al 6).

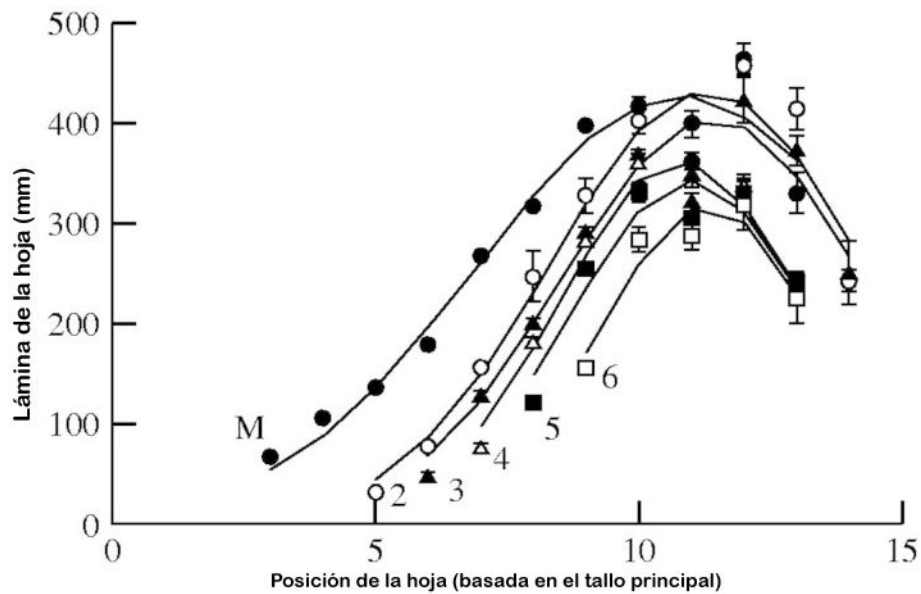


Figura 2.10: Longitud de la hoja [4].

Usando los datos de la gráfica de M y la herramienta de Microsoft Excel se creó la gráfica de la Figura 2.11 donde se relaciona la longitud de la hoja (en centímetros) respecto a su posición nodal. Usando esta misma herramienta se obtuvo la función que relaciona la longitud de las hojas con su posición nodal.

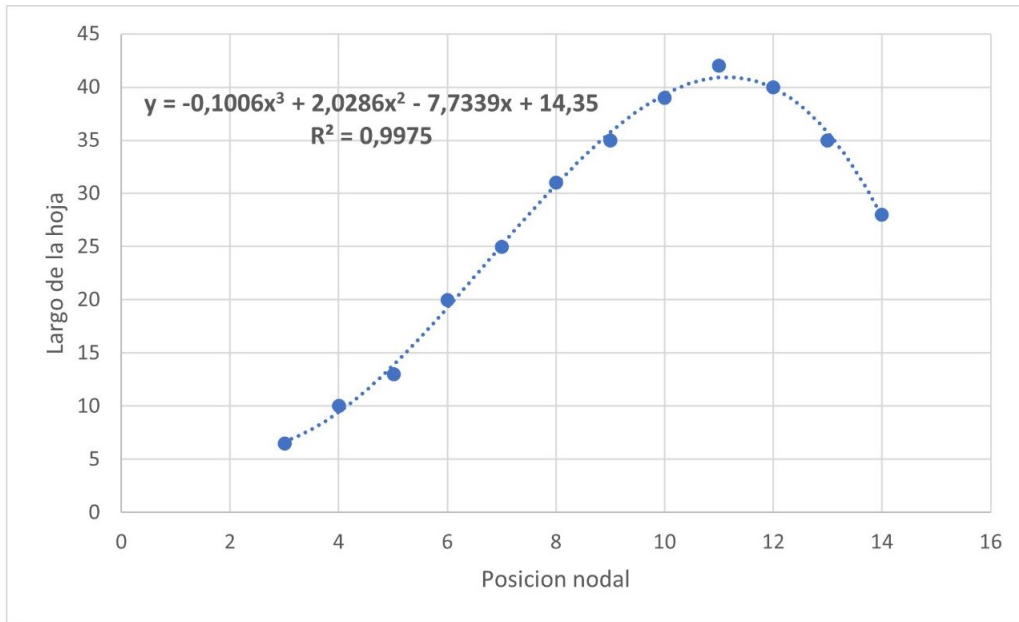


Figura 2.11: Longitud de la hoja, gráfica obtenida a partir de la información de la Figura 2.4.

La Función 2.1 se usa para representar la longitud de las hojas respecto a su posición nodal en el tallo principal. Donde  $L_n$  es la longitud de las hojas y  $n$  es la posición nodal.

$$L_n = -0,1006n^3 + 2,0286n^2 - 7,7339n + 14,35 \quad (2.1)$$

Los valores de  $n$  más cercanos a cero representan la posición nodal más cercana a la base de la planta

**Ancho de las hojas** En Watanabe 2005 [4] se demuestra una relación entre el ancho de la hoja y el largo de la lámina. En la Figura 2.12 se puede observar que esta relación se divide en tres grupos, las hojas del tallo principal, las de los macollos y las bandera.

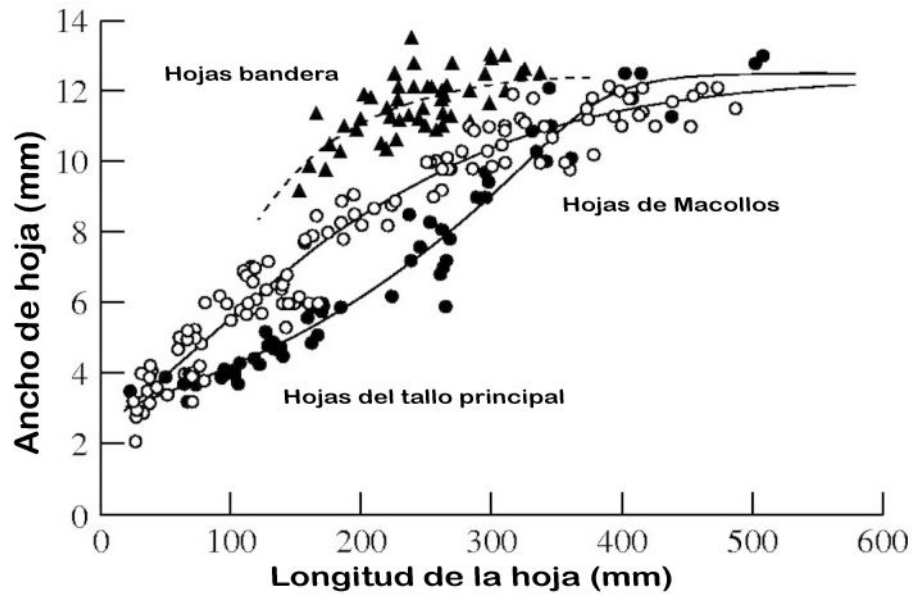


Figura 2.12: Ancho de las hojas.

Para determinar la función que relacione el ancho de las hojas con el largo de la lámina, se tomaron los valores, en centímetros, que corresponden a la gráfica del grupo de hojas del tallo y se graficaron en Microsoft Excel, obteniendo como resultado la gráfica de la Figura 2.13.

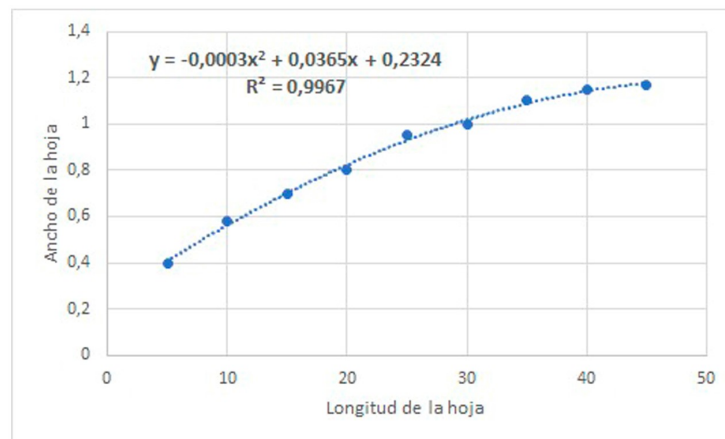


Figura 2.13: Ancho de las hojas en relación a el largo de las hojas.

De esta manera se obtiene la Función 2.2 para obtener el ancho de la hoja ( $W_n$ )

$$W_n = -0,0003Ln^2 + 0,0365Ln + 0,2324 \quad (2.2)$$

De la misma manera se obtuvo la gráfica del grupo de hojas bandera, para obtener la relación entre el el ancho de las hojas bandera y en largo de la lamina de las hojas bandera, obteniendo la Figura 2.14 de la que se obtiene la Función 2.3 donde se relaciona el ancho de las hojas bandera ( $Wb$ ) y el largo de la lamina de las hojas bandera ( $Lb$ ).

$$Wb = 0,0001Lb^3 - 0,0119Lb^2 + 0,3534Lb - 2,2697 \quad (2.3)$$

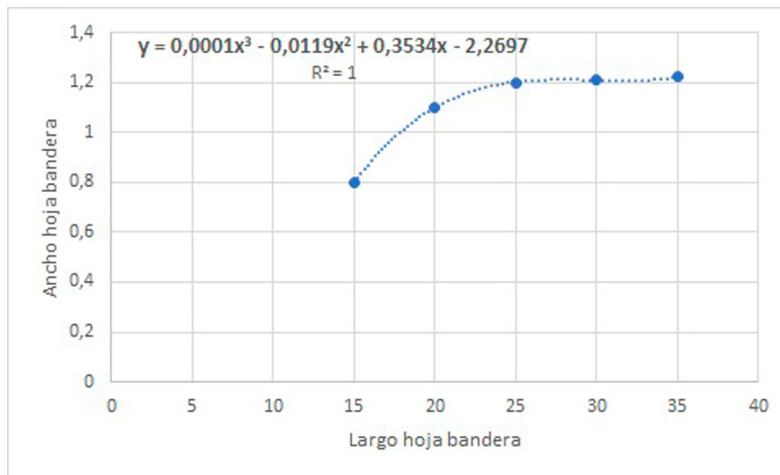


Figura 2.14: Ancho de la hoja bandera en relación a el largo de las hoja bandera.

**Ángulo Axial** Para determinar el ángulo axial entre la vaina y las hojas que se observa en la Figura 2.6, se usarán como referencia las investigaciones presentes en Watanabe et. Al. [4], donde se relacionó el ángulo axial con la posición nodal de las hojas, en tres grupos diferentes, las hojas del tallo principal, los macollos primarios y las de los macollos secundarios.

El ángulo axial de las hojas del tallo principal varía entre los  $15^\circ$  y los  $40^\circ$ , como se puede observar en la Figura 2.15. Las barras verticales muestran el error estándar.

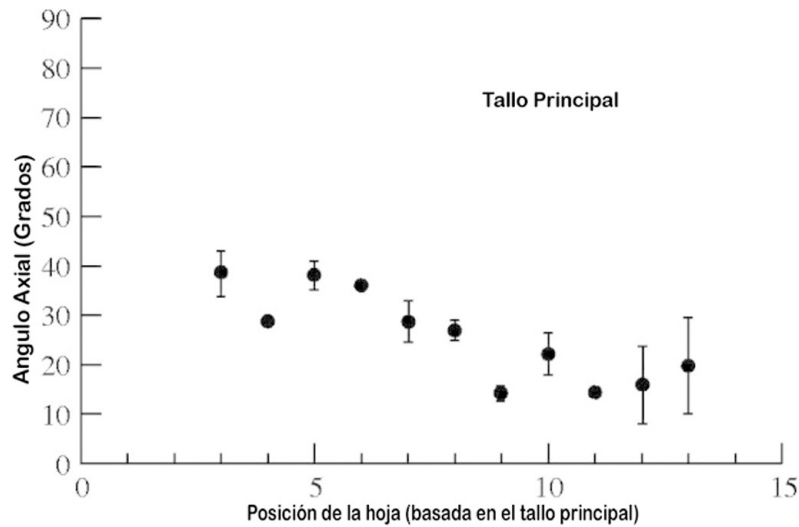


Figura 2.15: Ángulo Axial tallo principal.

En los macollos primarios esta relación se puede observar en la Figura 2.16, el ángulo axial en estas hojas varía entre los 12° y los 75°, la numeración 2nd al 7th simbolizan el orden en el que emergió dicho macollo.

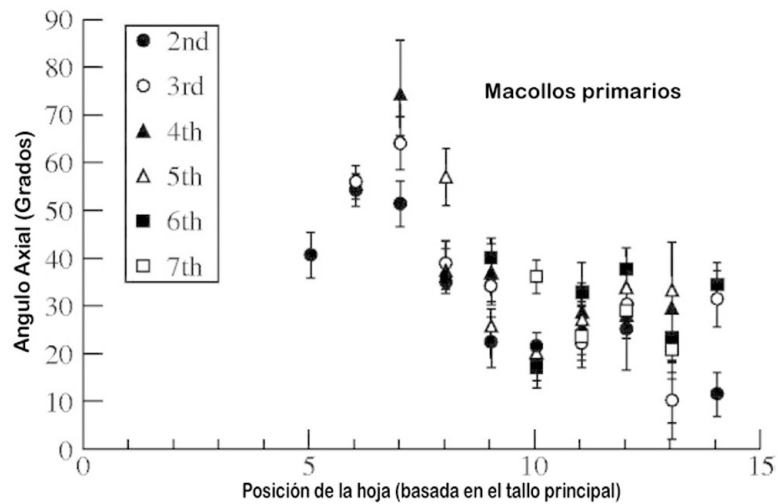


Figura 2.16: Ángulo Axial macollos primarios.

En los macollos secundarios el ángulo axial varía entre los 16° y los 60°, como se observa en la Figura 2.17, la numeración que se muestra el orden de surgimiento del macollo secundario en el macollo primario, por ejemplo, el “2-1” significa que es el primer macollo secundario que salió del segundo macollo primario.

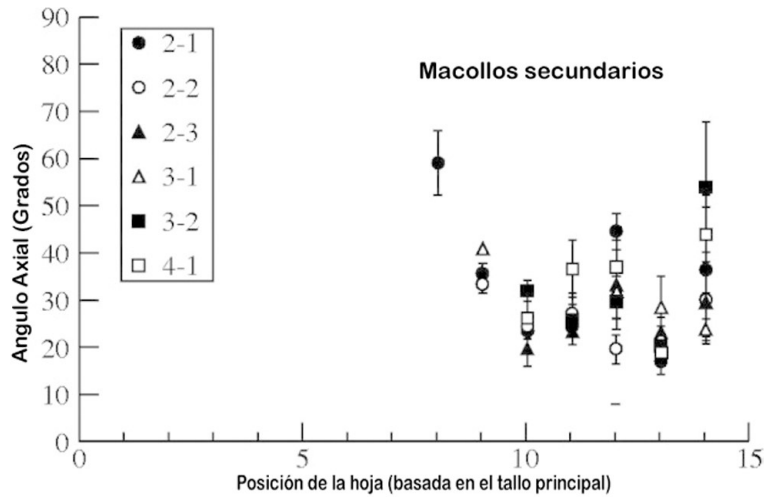


Figura 2.17: Ángulo Axial macollos secundarios.

**Longitud de la vaina de la hoja** Entre la longitud de la vaina y la longitud de la lámina, existe una relación lineal [4]. Esta relación esta expresada en la Función 2.4 donde  $L_v$  es la longitud de la vaina en mm y  $L_n$  es la longitud de la hoja en mm. Esta relación se obtuvo con base en los datos de la Figura 2.18.

$$L_v = 41,4 + 0,393L_n \tag{2.4}$$

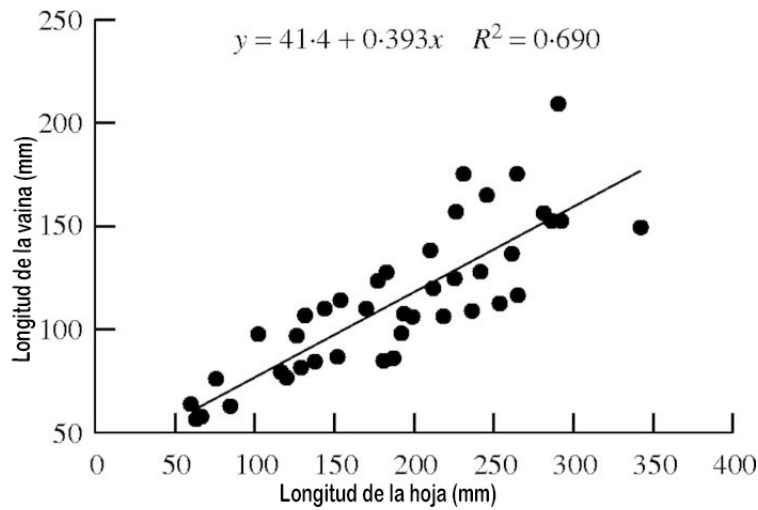


Figura 2.18: Longitud de la vaina con relación a la longitud de la hoja.

### Tallo de la planta de arroz

El modelo del tallo de la planta se basó en lo encontrado en la Sección 1.1.4, teniendo en cuenta esta información se dividió el tallo en dos partes, los nodos y los internodos, que están dispuestos de manera intercalada.

**Nodos** Debido a que no se encontró información suficiente para modelar la planta de arroz, la representación de los nodos de la planta se usó la información disponible en la Sección 1.1.4, junto con la descripción disponible en Chang Bardenas EA [16], además de fotografías disponibles en internet como por ejemplo la Figura 2.19



Figura 2.19: Fotografía de un nodo.

Adicionalmente se realizaron ilustraciones a mano basadas en la información obtenida anteriormente, como se observa en la Figura 2.20.



Figura 2.20: Ilustración a mano de un nodo.

**Internodos** Para seleccionar la forma con la que se representan los internodos se utilizó la información disponible en la Sección 1.1.4, donde se describe la forma de los internodos como cilíndrica, por lo tanto se usó esta figura geométrica para la creación de los internodos en el tallo. Otra de las características es que los internodos de la base son más gruesos y cortos que los internodos de la parte superior, por lo que era necesario conseguir que a medida que la posición nodal de los internodos aumente la longitud de los internodos también lo haga, para esto se creó la siguiente Función 2.5 que calcula el tamaño del primer nodo  $L0$ .

$$L0 = (L - A * Ldif) - N * Lnodos \quad (2.5)$$

Donde  $L$  es la longitud total del tallo,  $Ldif$  es el incremento que tiene un nodo respecto al nodo anterior,  $N$  es el número de nodos del tallo.  $Lnodos$  es la longitud de un nodo y  $A$  está dada por la Función 2.6.

$$A = 0,5 * N * (N + 1) \quad (2.6)$$

Para la característica de grosor se debía asegurar que el grosor de los internodos más cercanos al tallo sea mayor al de los ubicados en la parte superior, para lo que se decidió crear una tasa de decremento en el grosor denominada  $Dif$  caracterizado por la Función 2.7.

$$Dif = (Wbase - Wfinal) * dl/L \quad (2.7)$$

Donde  $Wbase$  es el ancho del tallo en la base,  $Wfinal$  el ancho del tallo en su parte final y  $dl$  es el crecimiento que tiene el tallo en cada ciclo de la animación.

### 2.4.2. Crecimiento de la planta de arroz

Para el modelado de la planta de arroz se utilizó el formalismo del lenguaje de sistemas L descrito en Lindermayer en 1968 [17] y en P. Prusinkiewicz A Lindenmayer en 1990 [18] que se indica en la Expresión 2.8.

$$Predecesor : Condicion \rightarrow Sucesor \quad (2.8)$$

Donde el predecesor simboliza el proceso presente en el que está la planta, ya sea una etapa o el desarrollo de uno de sus órganos, el predecesor da lugar al sucesor que puede ser el crecimiento, el inicio de una nueva etapa, el crecimiento de un nuevo órgano o el cambio de alguna característica bajo cierta condición.

Para el desarrollo del modelo se realizaron expresiones tanto para la creación de las diferentes partes de la planta como para su combinación que permita modelar un tallo completo de la planta con nodos, internodos, vainas y hojas.

**Partes de la Planta** En las expresiones de sistemas L que se han obtenido se representan el largo de la parte de la planta en cada ciclo del programa y  $n$  es la posición nodal que se está animando en ese momento como se muestra en la expresión .

$$Predecesor(n) : l = Condicion \rightarrow Sucesor(n) \quad (2.9)$$

Para el desarrollo del tallo principal se tomó como referencia la generalidad de crecimiento de la familia Poaceae a la que pertenece el arroz [19], que se puede observar en la Figura 2.21

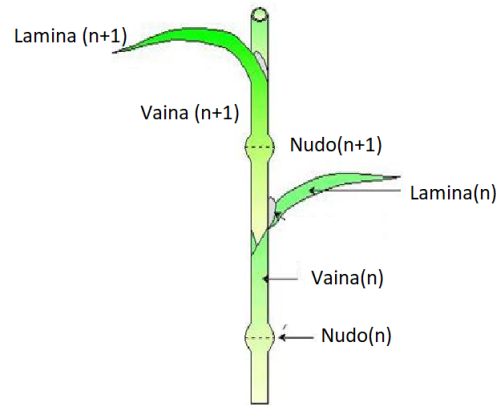


Figura 2.21: Generalización tallo de la familia Poaceae.

Con base en esta información se crearon las siguientes expresiones donde los predecesores y el sucesor son funciones que crean la animación de la morfológica de las partes de la planta, que tienen como entrada las variables descritas en la Sección 2.2.

$$Nodo(n) : l = Lnodo(n) \rightarrow Internodo(n). Si, n \leq Nmerodenodos \quad (2.10)$$

$$Intenodo(n) : l = L(n) \rightarrow Nudo(n+1)Vaina(n) \quad (2.11)$$

Donde la  $vaina(n)$  tiene su origen en el  $nodo(n)$  como se observa en la Figura 2.21.

$$Vaina(n) : l = Lnodo \rightarrow Lamina(n) \quad (2.12)$$

**Etapas de la Planta** Para definir el modelo del crecimiento de la planta de arroz se debe tener en cuenta la información obtenida en la Sección 1.1.1, con esta información se puede crear una serie de funciones que permitan la animación del crecimiento de la planta de arroz, la ejecución de estas funciones esta determinado por una serie de formalismos del lenguaje de sistemas L descrito en la Expresión 2.8.

Adicionalmente, para el entendimiento gráfico del crecimiento de la planta de arroz se tuvo en cuenta la Figura 2.22, disponible en W. Jones et al. [20], donde se muestra la secuencia de tallos que se generan en una planta de caña de azúcar a partir de una única yema se puede observar un comportamiento fractal en su desarrollo.

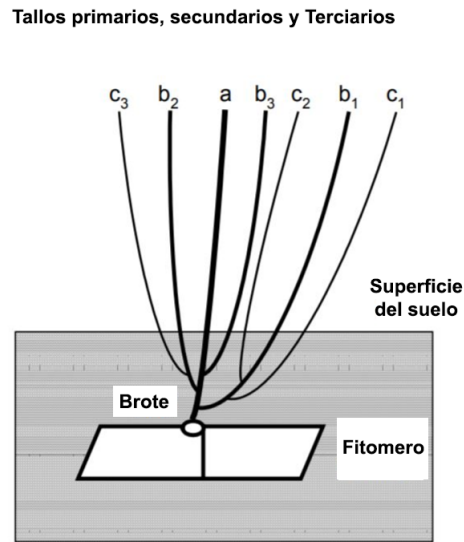


Figura 2.22: Esquema de brote de la caña de azúcar.

Con el modelo del tallo completo de la planta de arroz (Expresiones 2.10, 2.11 y 2.12) , se crearon 3 tipos de tallos, **M** que representa el tallo principal, **N1** que representa a los macollos primarios y **N2** que representa a los tallos secundarios. Las tres funciones para crear tallos son iguales en tanto a forma aunque con diferentes características en tanto a los ángulos en los que emergen y su tamaño.

El modelo de distribución de macollos primarios y secundarios de la planta de arroz es simétrico, basado en la Figura 2.23, por lo tanto la planta de arroz tendrá cuatro macollos primarios (N1) que salen del tallo principal (M) y a su vez de cada macollo primarios saldrán cuatro macollos secundarios (N2).

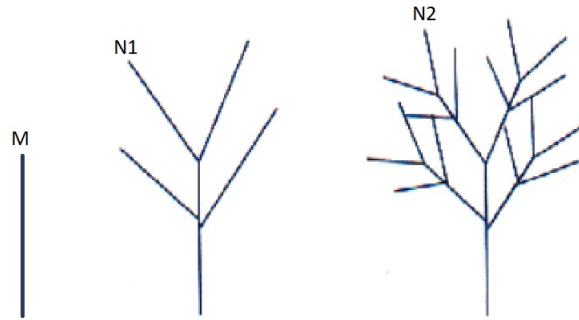


Figura 2.23: Primeras 3 iteraciones de un fractal simple

La primer etapa (germinación), se representa por la Expresión 2.13, en esta etapa se recrea el crecimiento de las primeras hojas que emergen y posterior a esta, se pasa a la etapa de plantula.

$$Germinacin() : True \rightarrow Plantula() \quad (2.13)$$

Para la etapa de Plantula se tiene la Expresión 2.14, durante esta etapa inicia el crecimiento del tallo principal. La condición es el tiempo que se debe esperar para que inicie esta etapa y el sucesor de esta etapa es el macollamiento.

$$Plantula() : Tiempo = Tiempodeespera \rightarrow M()Macollamiento() \quad (2.14)$$

La etapa de macollamiento esta dada por las Expresiones 2.15, aquí se da la creación de los primeros cuatro macollos primarios, cada uno tiene una numeración de 0 a 3 que simboliza su posición. La expresión determina el tiempo en que salen, su tamaño y otras características.

$$Macollamiento() : True \rightarrow N1(0)N1(1)N1(2)N1(3) \quad (2.15)$$

De cada macollo primario se desprenden cuatro macollos secundarios como se observa en 2.16.

$$N1(numero) : Tiempo = Tiempodeespera \rightarrow N2(pos + 0)N2(pos + 1)N2(pos + 2)N2(pos + 3) \quad (2.16)$$

**Pos** determina el macollo principal del que saldra cada macollo secundario se utilizo la Ecuación 2.17 , los valores de 0 a 3 representan la posición que ocupan dentro de este macollo para determinar las característicos de cada macollo secundario.

$$pos = 4 * (1 + numero) \quad (2.17)$$

### 3.1. Estructura de software

Para ejecutar el modelo planteado en la Sección 2.4 es necesario diseñar un algoritmo en el que se implemente el modelado y la animación en 3D del crecimiento de la planta, para lo cual se ha estructurado un software basado en el modelo DSSAT que sirve para calcular el crecimiento y desarrollo esperados de las plantas basándose en ecuaciones que describen el comportamiento del cultivo frente a ciertas condiciones [21].

La principal característica que se tomó como referencia es la estructuración modular que posee el modelo CSM (Modelo de sistema de cultivos) [22].

#### 3.1.1. Módulos del software

El diseño modular del software esta basado en el propuesto para el programa de DSSAT que tiene diferentes módulos del software de modelado y la interacción entre ellos (Disponible en [23]), los módulos incluidos en el software para el modelado de la planta de arroz se pueden observar en la Figura 3.1.

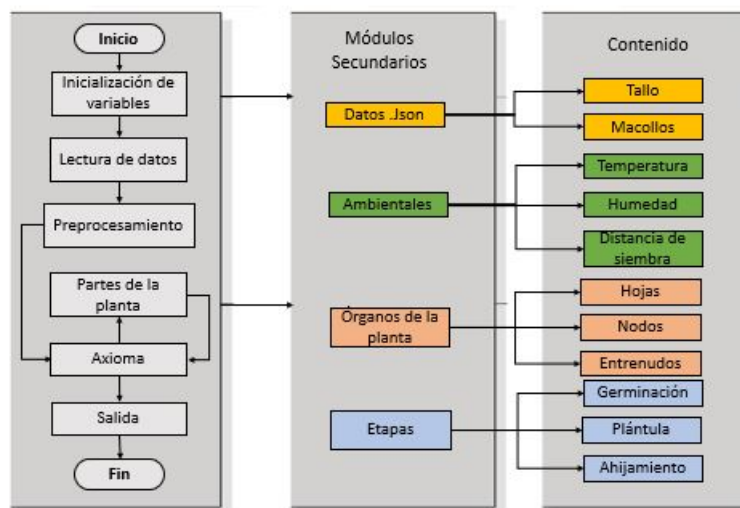


Figura 3.1: Estructura de módulos que componen el software de modelado 3D del crecimiento de la planta de arroz.

**Datos externos** Este módulo extrae la información procedente del proyecto "Sistema de captura de datos morfológicos mediante análisis de imágenes durante el crecimiento de plantas de arroz", desde donde se reciben datos de la planta de arroz obtenidos a través del análisis de imágenes de la planta.

Con estos datos se puede realizar la reconstrucción y animación del crecimiento de la planta de arroz, los datos que recibe el módulo son:

- Altura de la planta.
- Número de Nodos de la planta.
- Ancho de la base del tallo.
- Ancho de la parte superior del tallo.
- Número de macollos.
- Altura de los Macollos.
- Ángulo de los macollos con el suelo.
- Largo de las hojas.
- Ángulo axial de las hojas.

En este módulo también se pueden recibir algunos datos climáticos que permiten crear la animación del crecimiento de la planta de arroz usando las funciones descritas en la Sección 2.4.1 y los datos de la planta en sus primeras etapas.

**Preprocesamiento** Este módulo se encarga de ejecutar todas las funciones y ecuaciones que se puedan hacer fuera de los ciclos de la animación, con el fin de crear una animación más fluida.

El módulo ejecuta las funciones y almacena los resultados en vectores previamente construidos con tamaños determinados, estos vectores se leen en las diferentes partes del ciclo de animación.

La necesidad de implementar este módulo en el software surge durante las primeras pruebas de animación donde se empezaron a crear plantas de arroz sencillas con un máximo de 10 macollos, en estas pruebas la animación tardaba alrededor de 8 minutos en completarse, posterior a la implementación del preprocesamiento la animación tardó alrededor de 3.5 minutos.

Ya que calcular algunos datos dentro de las funciones de producción causaba que cada ciclo tardara más de lo esperado se decidió que los siguientes datos se calcularían en la etapa de preprocesamiento:

- Altura de los Macollos.
- Ángulo de los macollos con el suelo.
- Ángulo azimutal de los macollos (vista desde la parte superior de la planta).

- Largo de las hojas.
- Ángulo axial de las hojas.
- Ángulo azimutal de las hojas.
- Color de las hojas.
- Forma de las hojas.

El módulo de preprocesamiento tiene dos funciones principales:

La primera es procesar los datos recibidos en el módulo de datos externos para usarlos en la animación, almacenándolos en vectores y así puedan ser usados para completar datos faltantes.

La segunda es ejecutar todas las funciones descritas en la Sección 2.4, que se usan para obtener las características necesarias y los datos necesarios para la animación. En este módulo también se ejecutan las reglas de crecimiento basadas en los factores climáticos que se incluyeron según lo presentado en la sección 3.1.2.

**Reglas de crecimiento** Este módulo contiene lo relacionado a las reglas de crecimiento determinadas por las variables climáticas, de temperatura, humedad y separación entre las plantas que se observa en la Figura 3.1 y corresponden al modulo secundario **Ambientales**. En este modulo se tienen los diferentes casos que se deben aplicar dependiendo los valores que tomen estas variables, por ejemplo con estas reglas se puede determinar el color de las hojas, el largo del tallo o el número de macollos.

**Partes de la planta** Este módulo contiene las funciones para la creación de las diferentes partes de la planta. En este módulo están las funciones de los siguientes órganos:

- Nodos
- Internudos.
- Vaina de la hoja.
- Lámina de las hojas.
- Hojas bandera.
- Primeras hojas.

Cada una de las funciones recibe como entrada todos lo datos necesarios para su simulación como la forma, tamaño, ángulos en los que están dispuestos y color.

**Crecimiento de la planta** también denominado Axioma, este módulo es el encargado de desarrollar las expresiones que representan las etapas de germinación 2.13, plántula 2.14, macollamiento 2.15 y macollos 2.16 para crear la representación en 3D del crecimiento del arroz en sus diferentes etapas.

### 3.1.2. Reglas de crecimiento

En base a los datos de la Sección 2.3, lo presentado en Vargas P [24]. De las características del proyecto se crearon reglas de crecimiento basadas en algunas características ambientales.

Para la creación de las reglas, los factores ambientales que se tuvieron en cuenta son la temperatura durante las etapas de germinación, plántula y ahijamiento, también se tuvo en cuenta la humedad general y la distancia de siembra entre plantas.

De esta manera se obtuvieron las siguientes reglas de crecimiento:

- Si la temperatura en el periodo de germinación está por debajo de los 10 C causan que la planta no nazca. En este caso el algoritmo no ejecutara la sección de germinación.
- Si la temperatura en el periodo de germinación entre los 10 C y 13 C la planta crecerá pequeña y débil, y demora en el tiempo de germinación.
- Temperaturas entre 13C y 16C ocasionan demora en el tiempo de germinación
- Si la temperatura está entre 7C y 8C o la humedad es baja o distancia entre plantas es menor a 10 cm la planta tendrá un bajo macollamiento (entre 0 y 5).
- Para una temperatura entre 8 C y 16C o humedad media del suelo la planta tendrá entre 6 y 10 macollos.
- Si la distancia entre plantas es menor a 15 cm, la planta tendrá entre 6 y 10 macollos [25].
- Si la temperatura en las etapas de plántula y ahijamiento esta entre 16 C y 23 C o si la distancia entre plantas esta entre 15 cm y 20 cm la planta tendrá entre 10 y 15 macollos.
- Si la temperatura es superior a los 32 C se reduce al macollamiento.
- Si la humedad del suelo es baja hace que la longitud de la planta sea menor.
- Si la temperatura es baja (entre 7 C y 12 C) se produce marchitamiento en la planta, lo que causa que el color de las hojas tome un tono amarillento.
- Humedad baja causa que las puntas de la hoja sean de color blanco.
- Temperaturas superiores a 45 C causan que las puntas de las hojas se tornen de color blanco.

Bajo condiciones óptimas la planta llega a crecer entre 100 cm y 130 cm y 20 macollos.

El tamaño de los macollos se encuentra almacenado dentro de un vector de tamaño 20, para controlar el número de macollos de acuerdo a lo que indican las reglas morfológicas se utilizó este vector ya que, para un número de macollos menor a 20, se decidió poner un tamaño igual a 0 cm en las posiciones del vector que no deberían crecer. Por ejemplo si la planta tiene 16 macollos, en el vector de tamaños, 4 macollos secundarios tendrían tamaño igual a 0 cm.

### 3.2. Estructura de datos

Para los datos entrantes, correspondientes a la primera etapa del proyecto (Etapa de captura), se opta por utilizar el formato .JSON. Este es uno de los tantos textos simples utilizados para el intercambio de datos, a diferencia de los demás formatos, este fue seleccionado debido a su gran versatilidad, es mucho más sencillo escribir un analizador sintáctico, resulta más fácil analizar cualquier fichero con este lenguaje, brinda una transmisión de datos limpia y fluida. Su estructura y organización al momento de manipular arreglos tanto para escritura como lectura, es sencilla y concuerda con lo que el proyecto requiere [11].

JSON es un formato de texto que es completamente independiente del lenguaje, pero utiliza convenciones que son familiares para los programadores de la familia de lenguajes C, incluidos C++, C, además de Java, JavaScript, Perl, Python y muchos otros. Estas propiedades hacen de JSON un lenguaje ideal para el intercambio de datos [26]. La amplia compatibilidad fue una de las razones por las cuales se selecciona el formato JSON para la transmisión de datos. Ya que se utiliza PlantCV para la exportación de los datos desde la fase de captura y OpenAlea para la recepción de datos en la etapa de modelamiento, esta ventaja por parte de JSON ayuda a manejar con facilidad el proceso de comunicación en las dos fases del proyecto.

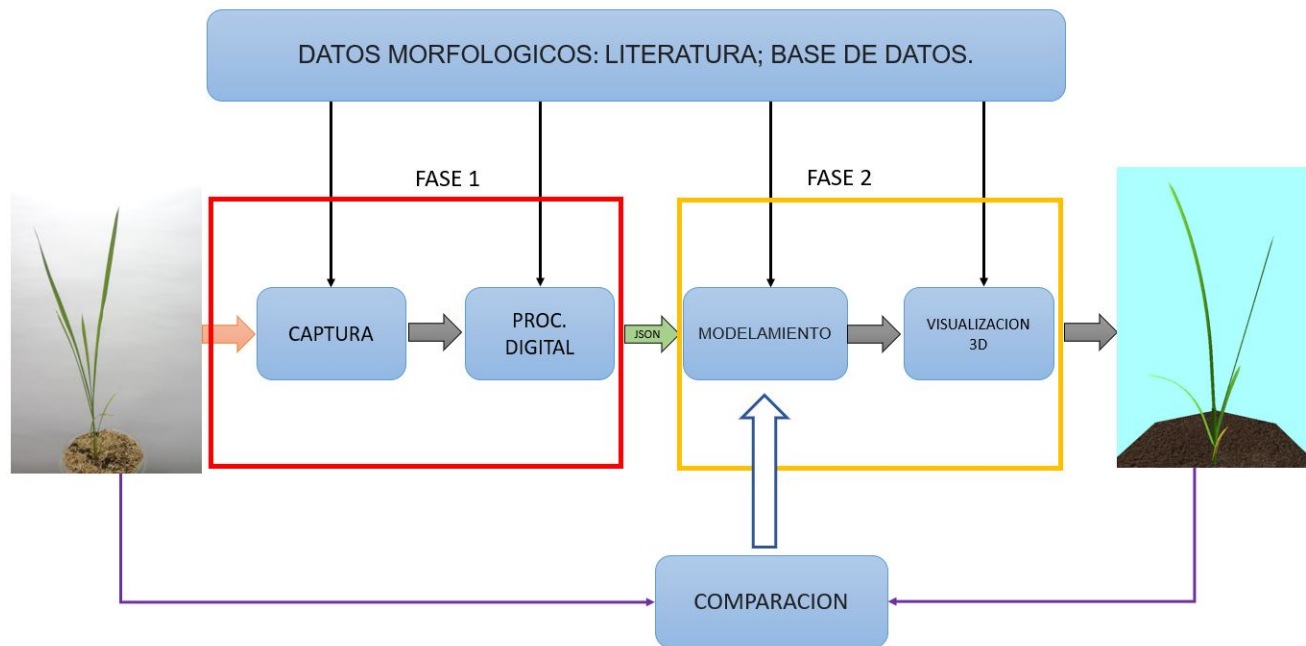


Figura 3.2: Diagrama proyecto para P4 ÓMICAS.

En la Figura 3.2 se puede observar la representación del envío y recepción de los datos morfo-

lógicos. Este proceso consiste en la exportación de un archivo JSON por parte de la Fase 1 y de un algoritmo de lectura en la Fase 2. De esta manera se obtienen los datos para ser utilizados en la fase de modelación. A continuación, se explica la sintaxis utilizada para la escritura y lectura del archivo JSON.

JSON se basa en dos estructuras:

- Una colección de pares de nombre / valor. En varios lenguajes, esto se realiza como un objeto, registro, estructura, diccionario, tabla hash, lista con clave o matriz asociativa [26].
- Una lista ordenada de valores. En la mayoría de los lenguajes, esto se realiza como una matriz, vector, lista o secuencia [26].

Para el manejo de los archivos JSON en el proyecto, se utilizaron las dos estructuras. Ya que se utilizaron `objects` y `arrays`. A continuación se da una breve explicación de sus sintaxis y se ira relacionando con lo realizado en el proyecto.

**Objects** Es un conjunto desordenado de pares de nombre / valor. Un objeto comienza con { llave izquierda y termina con } llave derecha . Cada nombre es seguido por : dos puntos y los pares de nombre / valor están separados por , coma . En la Figura 3.3 se puede observar la representación de su sintaxis [26].

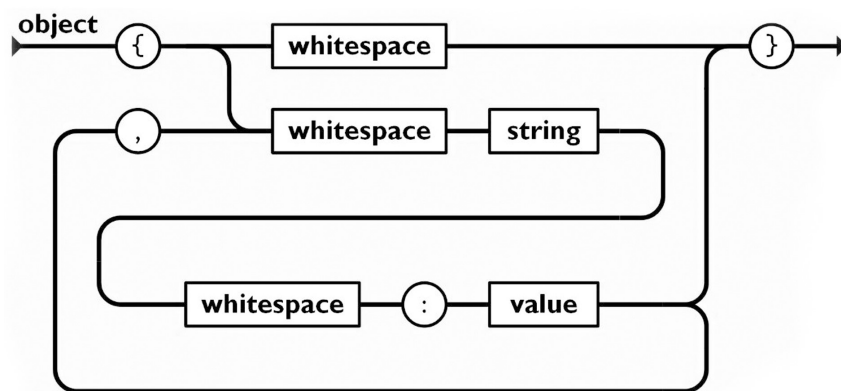


Figura 3.3: Sintaxis para un Object.

**Arrays** Es una colección ordenada de valores. Una matriz comienza con [ (corchete izquierdo) y termina con ] (corchete derecho). Los valores se separan mediante , comas [26]. Lo mencionado se puede ver representado en la Figura 3.4.

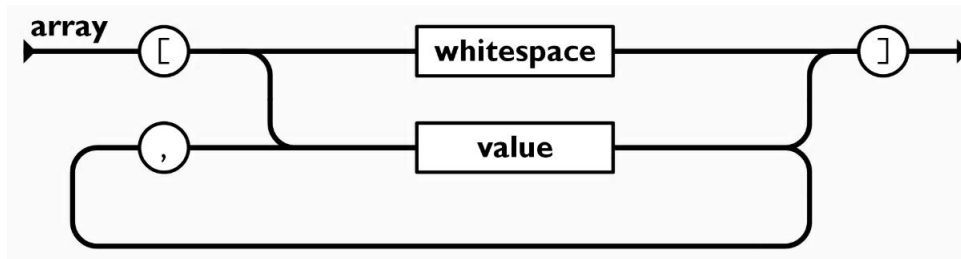


Figura 3.4: Sintaxis para un Array

Los elementos representados en las Figuras 3.3 y 3.4 se pueden evidenciar en la Figura 3.5 que representa parte del algoritmo del archivo JSON, el cual es exportado en la Fase de captura del proyecto.

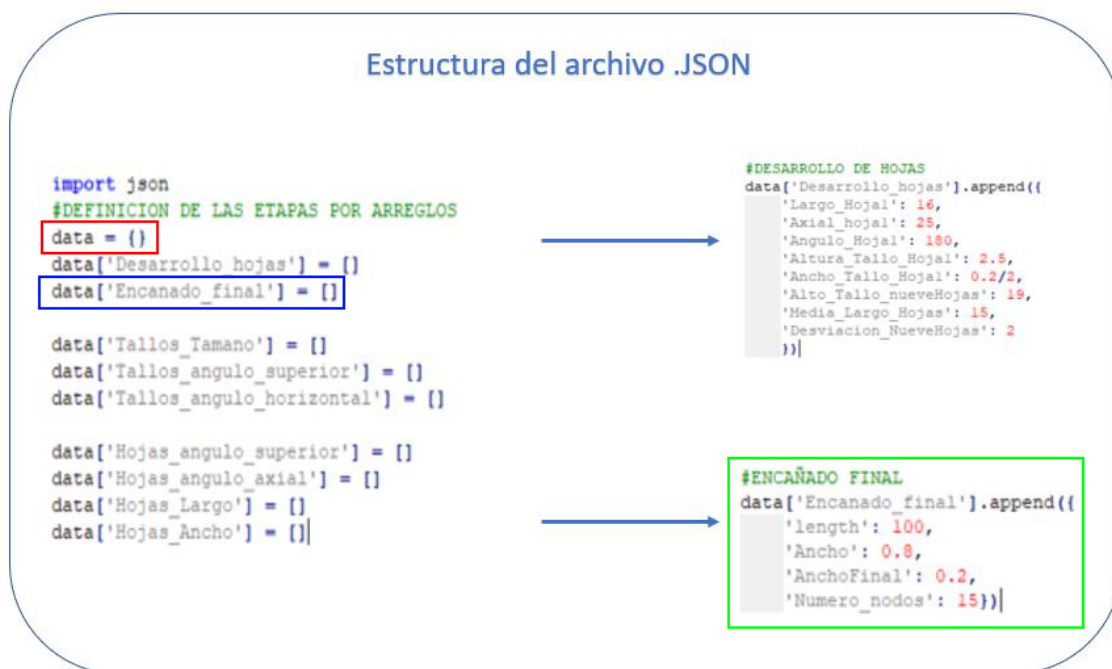


Figura 3.5: Estructura del archivo JSON.

Así como se puede identificar en la Figura 3.5 la estructura del archivo JSON consta de dos partes. En la primera se crean los elementos vacíos, en este caso se crea un Object, el cual esta marcado en un recuadro rojo. El Object contendrá todos los Arrays necesarios para la etapa de

modelación. La creación de los Arrays vacíos se puede evidenciar con el recuadro azul. En la segunda parte del Archivo se tiene el llenado de cada uno de estos arreglos creados inicialmente. En la Figura 3.5, marcado con un recuadro verde, se puede evidenciar como es el llenado de los Arrays. El cual consiste en agregar Object para cada variable. Este Archivo es exportado a la Fase de modelamiento, y en esta etapa se crea un algoritmo para la lectura de los datos morfológicos.

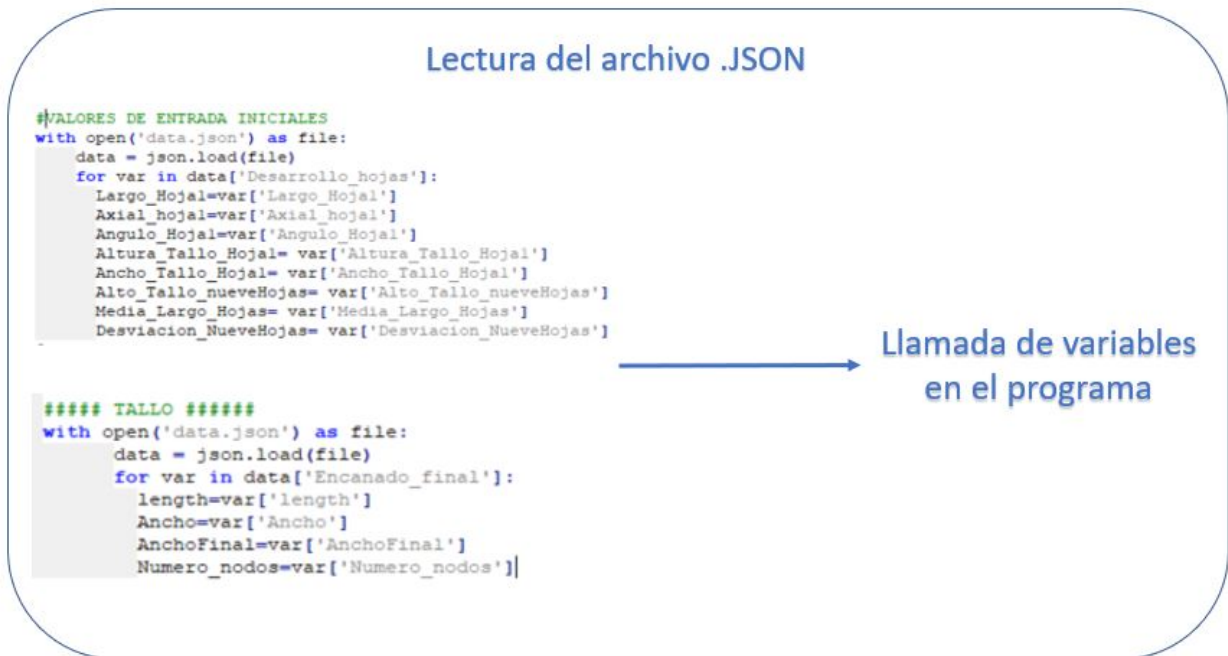


Figura 3.6: Lectura del archivo JSON.

En la Figura 3.6, se puede observar como se reciben los datos, y estos ya pueden ser llamados en el desarrollo del programa de modelamiento, estos datos entran para cada una de las etapas ya establecidas, generando una animación de manera continua, de las etapas correspondientes a la fase vegetativa.

# Implementación

---

## 4.1. Selección de plataforma

Se consideraron varias plataformas en las cuales se podría desarrollar el proyecto de modelamiento, incluso se experimentó con algunas. A continuación, se hará una evaluación de las plataformas que se consideraron y se explicaran los criterios que se tuvieron en cuenta para seleccionar OpenAlea como la plataforma ideal para este proyecto.

### 4.1.1. Evaluación de plataformas

**Blender:** Es una suite de creación 3D gratuita y de código abierto. Es compatible con la totalidad de la canalización 3D: modelado, montaje, animación, simulación, renderizado, composición y seguimiento de movimiento, incluso edición de video y creación de juegos [27]. Se experimenta con esta interfaz diseñando pequeños órganos vegetales. A pesar de tener una interfaz tan completa, es necesario programar por medio de scripts y Blender cuenta con esta posibilidad, ya que tiene compatibilidad con Python. De esta manera se pueden implementar algoritmos relacionados a sistemas L, que ayuden a generar las iteraciones necesarias, para producir una animación del crecimiento de una planta de arroz. Los usuarios avanzados emplean la API de Blender para scripts de Python para personalizar la aplicación y escribir herramientas especializadas; a menudo, estos se incluyen en las versiones futuras de Blender [27].

**Visual Studio** El entorno de desarrollo integrado de Visual Studio es un panel de inicio creativo que se puede usar para editar, depurar y compilar código y, después, publicar una aplicación. Un entorno de desarrollo integrado (IDE) es un programa con numerosas características que se pueden usar para muchos aspectos del desarrollo de software. Más allá del editor estándar y el depurador que proporcionan la mayoría de IDE, Visual Studio incluye compiladores, herramientas de finalización de código, diseñadores gráficos y muchas más características para facilitar el proceso de desarrollo de software [28]. Entre estos diseñadores gráficos se tiene Visual Studio Model Editor, el cual es utilizado para crear modelos desde cero o para ver y modificar modelos 3D más complejos que ya se hayan creado previamente con otras herramientas [29].

Visual Studio, fue la segunda herramienta en la que se experimenta para el desarrollo del proyecto. Al igual que Blender presenta una interfaz de desarrollo grafico y compatibilidad con varios lenguajes para modificar los distintos scripts. A continuación, se presentara la plataforma seleccionada para el proyecto y se presentara su debida justificación.

**OpenAlea** En la Sección 1.2.4 , ya se habló de lo que consiste OpenAlea. La plataforma incluye módulos para representar, analizar y modelar el funcionamiento y crecimiento de la arquitectura de la planta [30]. En esta sección se hablará de los respectivos módulos que presenta esta herramienta. Ya que fue una de las razones más potenciales para seleccionarla y trabajar en el proyecto. A continuación, se presentarán los módulos que presenta OpenAlea:

**L-Py** L-Py tiene un editor incorporado desarrollado con Qt (es un framework multiplataforma orientado a objetos ampliamente usado para desarrollar programas que utilicen interfaz gráfica de usuario), una biblioteca diseñada por UI [31]. En la Figura 4.1, se observa la ventana de L-Py con sus herramientas.

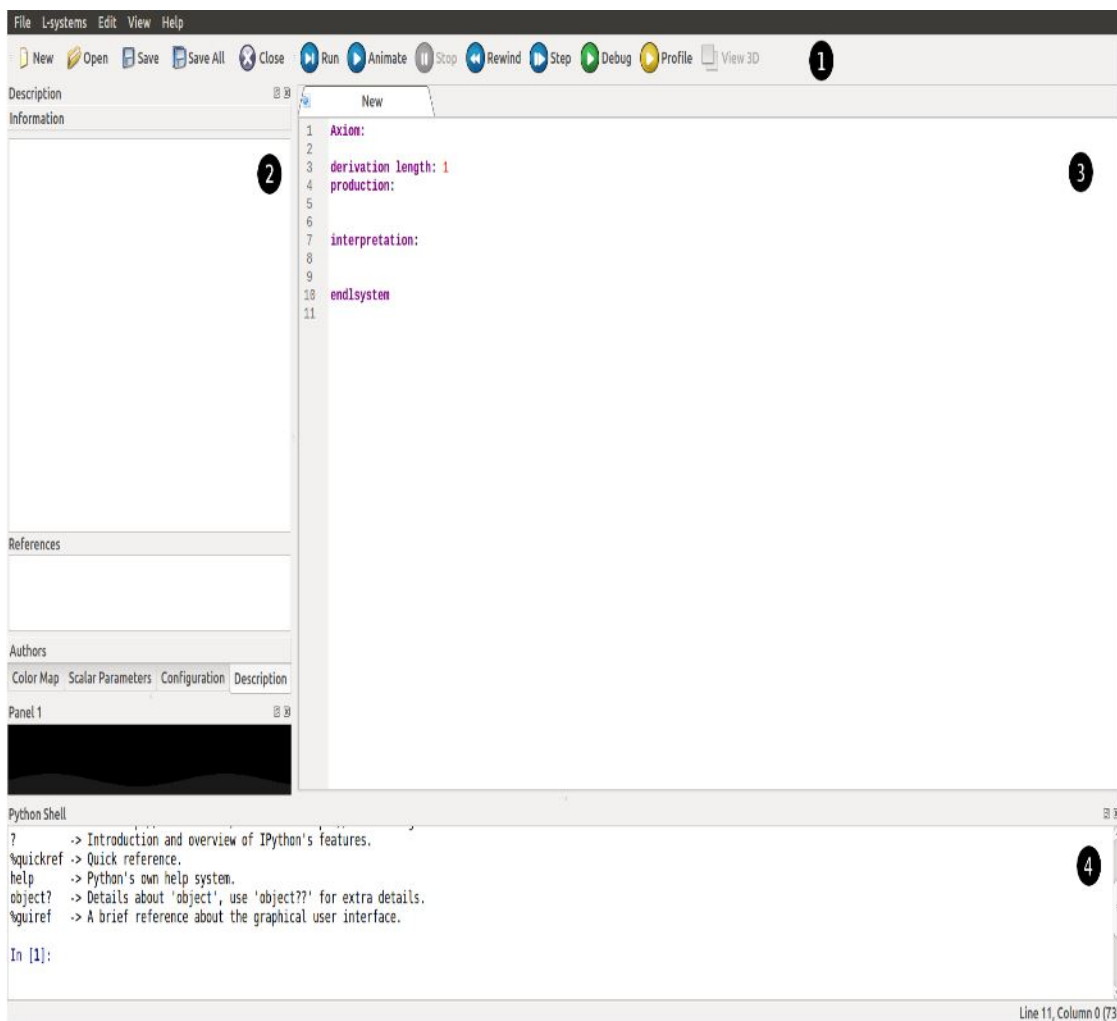


Figura 4.1: ventana L-Py

Lo que esta representado con un 1 en la Figura 4.1, es la barra de herramientas superior la cual

presenta las características más utilizadas de L-Py. Se puede crear, abrir o guardar el programa actual; se puede ejecutar y animar el trabajo con los botones apropiados o incluso ejecutarlo paso a paso y, en última instancia, se puede depurar o verificar el proceso y el tiempo de renderizado con el botón Perfil [31].

En la barra lateral izquierda, representada con el número 2 en la Figura 4.1. Se puede definir o controlar la metainformación sobre el modelo y su ejecución [31]:

- “Mapa de colores”: Creación de materiales o texturas personalizados para asignar a los objetos de la simulación.
- “Configuración”: Ajustes de ejecución del modelo.
- “Descripción”: Presentación de los modelos y sus colaboradores.

Representado con el número 3 en la Figura 4.1, se encuentra el Editor. L-Py brinda la posibilidad de codificar dentro de la aplicación mediante un editor incorporado. Todas las palabras clave de L-Py son reconocidas y coloreadas para una mejor legibilidad [31].

Representado con el número 4 en la Figura 4.1, se tiene el Shell de Python, el cual hace posible manipular los `lsystems` y sus variables, también puede mostrar los tiempos de ejecución. Por último en L-Py también se encuentra algunos paneles personalizados, los cuales son utilizados para la definición de objeto gráfico como función, curvas. Estos paneles personalizados fueron importantes para la realización de las formas de las hojas, ya que se utiliza curvas de Bézier [31].

**PlantGL** Es el complemento de L-Py, con este módulo se puede ver la representación gráfica del crecimiento de la planta de arroz en sus distintas etapas vegetativas. PlantGL es compatible con varios sistemas de modelado de plantas (L-studio, AMAP, etc.) y kits de herramientas gráficas (Pov-Ray, Vrml, etc.) [30]. PlantGL a su vez se compone de varios módulos independientes como una biblioteca geométrica, componentes GUI y envoltorios de Python.

Se pueden utilizar solos o en conjunto en una aplicación específica. los componentes computacionales centrales de PlantGL se implementan en el lenguaje compilado C++ para un mejor rendimiento. Además de la flexibilidad de uso, estos componentes también se exportan en el lenguaje interpretado de Python [30]. Al ser ejecutado PlantGL, se mostrará una ventana con cámara 3D con la cual se podrá desplazar libremente, detallando el modelo creado.

**Visualea** Para permitir a los científicos construir modelos complejos sin tener que aprender un lenguaje de programación textual, OpenAlea cuenta con un entorno de programación visual, llamado Visualea. En este módulo el usuario puede combinar gráficamente diferentes nodos de procesamiento proporcionados por las bibliotecas de OpenAlea y ejecutar el escenario final [13]. Los modelos gráficos muestran claramente las dependencias entre los procesos como una red gráfica y

facilitan la comprensión de la estructura del modelo. Los usuarios pueden editar, guardar y componer nodos de forma interactiva. En este enfoque visual, una interfaz gráfica está asociada con cada nodo y permite la configuración y visualización de sus parámetros y datos [13]. La personalización de parámetros de los datos proporciona al usuario una forma interactiva de explorar y controlar el modelo. Para generar más libertad a la hora de programar, los usuarios avanzados pueden agregar nuevos componentes simplemente agregando una función de Python directamente desde VisuAlea [13].

Visualea es una potencial herramienta para el modelado de plantas, más que todo para las personas que tienen poco conocimiento de programación. En este caso no se debe tener conocimiento de fractales. Pero así mismo se tiene la posibilidad de trabajar con Scripts por medio Python. De esta manera se realiza modelos mucho más detallados. Al módulo de Visualea se le puede sacar mayor provecho para el modelado de cultivos, ya que presenta una interfaz, librerías y un conjunto de herramientas idóneas para ello. A continuación, se presenta las ventanas de trabajo de Visualea [13].

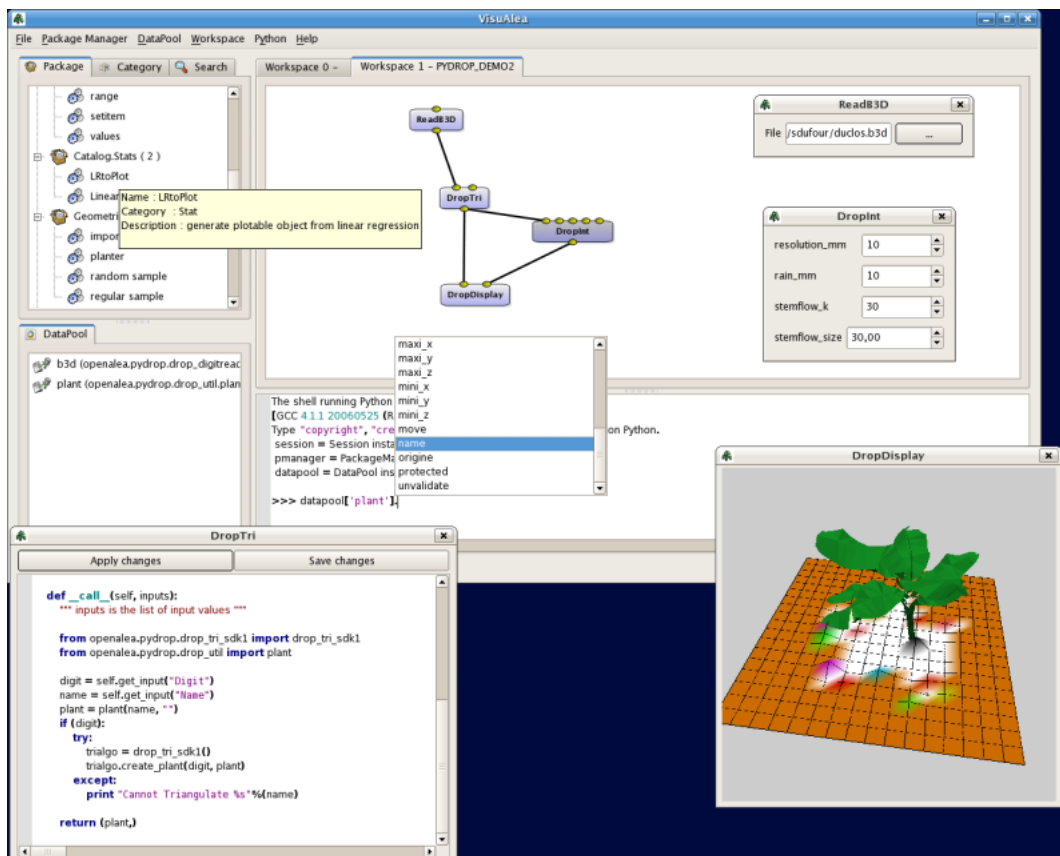


Figura 4.2: ventana Visualea.

Lo que se puede ver representado en la Figura 4.2 es el conjunto de módulos correspondientes a Visualea. La ventana principal está compuesta por:

- El administrador de paquetes que enumera los componentes lógicos
- Los espacios de trabajo permiten manipular funcionalidades representadas como cajas con entradas y salidas.
- Interfaz gráfica de un nodo.
- El intérprete de Python para interacción de bajo nivel con finalización.
- Editor de código Python.

#### 4.1.2. Conclusión de la elección

Ya mencionando las distintas características de los programas, se llega a una clara conclusión de la elección por OpenAlea. Esta plataforma y sus distintos módulos a diferencia de las demás plataformas vistas, están enfocados al modelado de plantas. L-Py y su entorno de funcionamiento por sistemas L fue acorde a las necesidades del proyecto de modelado para la planta de arroz. Además de presentar distintos ambientes de programación, tanto textual como visual. Esto queda a elección del usuario, dependiendo del proyecto que tenga pensado realizar. A continuación, se mencionarán las principales características de esta herramienta.

- Una herramienta de programación visual basada en un paradigma de flujo de datos que hace intuitivo el desarrollo de nuevos modelos y aplicaciones
- Herramientas y metodología para integrar modelos existentes en el lenguaje Python
- Una arquitectura basada en componentes que permite la creación dinámica y flexible de aplicaciones.
- Estructuras de datos y algoritmos compartidos para el modelado de plantas.

## 4.2. Estructura del algoritmo

El algoritmo está dividido en diferentes módulos como se describe en la sección 3.1.1. Se tiene diferentes tipos de funciones, las de producción y de organización. Las funciones de producción son las que crean los órganos de la planta y las de organización son las que dan orden a la creación de los órganos, haciendo el llamado a los algoritmos de producción en el orden adecuado, dependiendo la distribución espacial y temporal. La distribución espacial hace referencia al lugar en el que debe aparecer un órgano. Por ejemplo, al crear un tallo, se crea primero un nodo y luego un internodo, la distribución temporal es el momento en el que debe llamarse a una función. Esto está determinado por un tiempo de espera que está determinado por un número de ciclos determinado para cada

etapa u órgano.

En la Figura 4.3 se puede observar el diagrama de flujo del algoritmo.

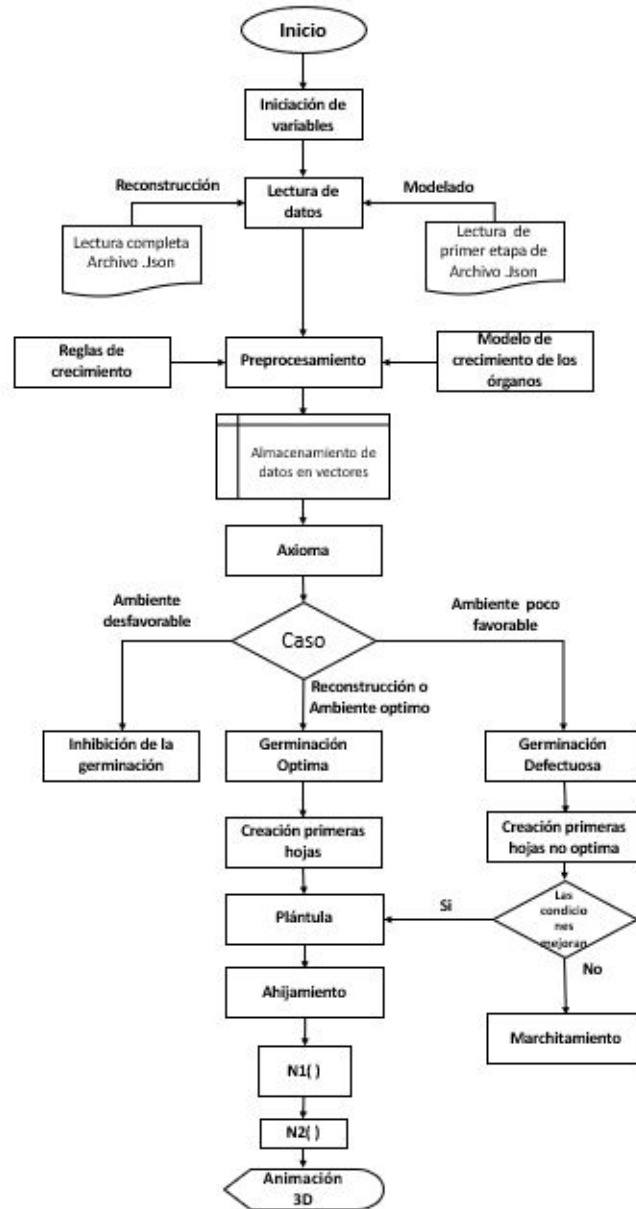


Figura 4.3: Diagrama de flujo del algoritmo.

Al inicio del programa se crean todas las variables y vectores que se van a usar durante la ejecución del código. Estas variables pueden llenarse durante la lectura de datos o durante el preprocesamiento.

El algoritmo tiene dos opciones para realizar la animación 3D del crecimiento de la planta:

**Reconstrucción** La opción de reconstrucción que no tiene en cuenta las reglas de crecimiento ambientales sino que se basa únicamente en la entrada de datos enviada desde el proyecto “Sistema de captura de datos morfológicos mediante análisis de imágenes durante el crecimiento de plantas de arroz”. En esta opción tampoco se usan las funciones descritas en la Sección 2.4.1 ya que estos datos están contenidos en el archivo Json.

**Modelado** La opción modelado sólo tiene en cuenta los datos enviados desde el proyecto “Sistema de captura de datos morfológicos mediante análisis de imágenes durante el crecimiento de plantas de arroz” correspondientes a la formación de las primeras hojas de la planta. Con base a estos datos se recrea la primer etapa de la planta. Para las etapas restantes se usan las funciones descritas en la Sección 2.4.1 y las reglas de crecimiento de la Sección 3.1.2.

**Axioma** La sección de Axioma da paso al inicio de la animación. En ésta se determina la etapa que iniciara la animación. Adicionalmente en esta sección se pueden crear otras estructuras que acompañaran el crecimiento de la planta. Por ejemplo, en esta parte del código se puede crear el suelo que servirá como referencia para el crecimiento de la planta.

**Salida: Animación 3D del crecimiento de la planta** él algoritmo debe generar una animación 3D del crecimiento de a planta de arroz.

### 4.3. Estructura de las funciones

Todas las funciones en OpenAlea que crean una estructura tiene la estructura que se muestra en la Figura 4.4 :

```

Función (l, entradas):
  Operaciones
  produce: creación  función (l + dl, entradas)

```

Figura 4.4: Estructura de las funciones en OpenAlea.

Dónde el dl es la tasa de crecimiento por ciclo, de la estructura que se va a crear. Para llamar a la función se usa **Función(0,entradas)**, este comando permite controlar el tamaño de las estructuras de una manera sencilla, usando la variable l, que simboliza la longitud del órgano de la planta en un determinado instante de tiempo.

La sección de **operaciones** es donde se ejecutan las expresiones matemáticas que no pueden ejecutarse en el módulo de preprocesamiento, ya que son variables que se deben actualizar cada ciclo. La sección de creación es donde se puede hacer el llamado a funciones que crean macollos completos o a funciones que crean pequeñas secciones de los órganos de la planta. La estructura para crear partes es la siguiente:

[ \(\text{ángulo superior}\) \&\(\text{Ángulo horizontal}\) ,(color) Formas geométrica ]

El corchete de apertura ([) almacena la posición actual en pila, mientras que el corchete de cierre (]) extrae esta posición de la pila para poder crear otras figuras en esta misma posición, esto se usa para crear dos órganos que emergen del mismo lugar.

**Creación de Formas geométricas** En OpenAlea se pueden crear formas geométricas a partir de funciones primitivas, por ejemplo, para crear un cilindro se usa la función **F(h,w)** donde h es la altura del cilindro y w su ancho, el resultado de esta función se muestra en la Figura 4.5



Figura 4.5: Cilindro creado con una función básica de OpenAlea.

Para crear formas más complejas se puede usar la función Sweep de la siguiente manera

**Sweep(Ruta,seccion,Longitud,Radio,Ancho Hoja,Variación del radio)**

Ruta es la forma que toma la figura desde el punto donde inicia hasta donde termina. Sección es el corte transversal de la hoja, es decir, como se vería alguna sección de la figura geométrica desde el eje X, el radio es la proporción que tendrá el ancho de la figura en cierto punto tomando como referencia los valores de la curva de Bézier (Variación del radio) como se puede observar en la Figura 4.6.

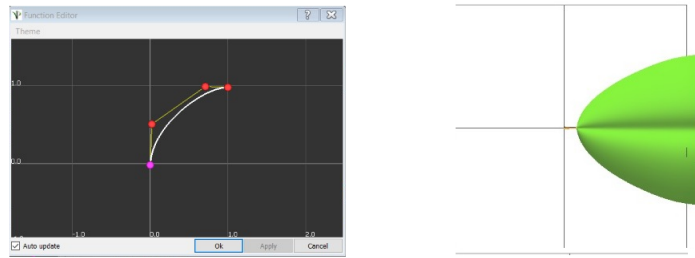


Figura 4.6: Figura producto de la función sweep.

#### 4.4. Implementación de color

Adicional a los objetivos propuestos se decidió implementar dentro del modulo de axioma la opción de dar diferentes tonos de color a la planta, usando el mapa de color de la herramienta OpenAlea que se puede observar en la Figura 4.7. Con esta opción se pudieron generar diferentes opciones de color para la planta.

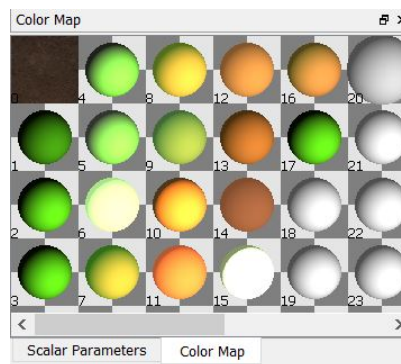


Figura 4.7: Mapa de colores en OpenAlea.

El color de las diferentes partes de la planta se define dando color a cada una de las figuras geométricas que lo componen, lo que permite dar diferentes colores a la planta, creando manchas en las hojas o haciendo segmentos del tallo de diferentes colores.

Para agregar los colores es necesario usar el comando `,(color)` donde **color** es la ubicación en la matriz del color o textura deseado para cada figura geométrica, el resultado de aplicar los colores creados se muestra en la Figura 4.8.

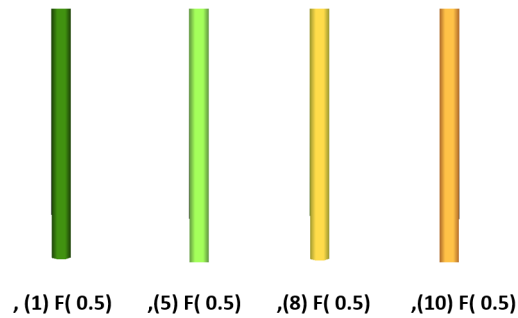


Figura 4.8: Resultado de la aplicación del mapa de colores.

Adicionalmente se creó una estructura que representa el suelo sobre el que crece la planta de arroz a la que se le agregó una textura de tierra, como se observa en la Figura 4.9.



Figura 4.9: Textura de tierra.

## 4.5. Detalles técnicos

Debido a las condiciones del proyecto se han creado algunas restricciones y detalles técnicos.

**Inestabilidad de OpenAlea** OpenAlea tiende a ser inestable debido a ser un proyecto que no se ha finalizado, por lo tanto, la aplicación tiende a dejar de funcionar de un momento para otro, también existen algunas funcionalidades, que a pesar de estar presentes en las diferentes ventanas del programa, no puede ejecutarse y hacen que el programa se cierre o deje de funcionar.

**Incapacidad de usar la GPU en OpenAlea** Otro de los problemas de OpenAlea es que no permite aprovechar toda la capacidad del equipo, esto pasa con la GPU, ya que el programa no se

puede ejecutar usando la tarjeta gráfica en la animación, lo que ocasiona que la animación consuma un porcentaje considerable de la CPU y sea menos fluida.

**Alto consumo de memoria RAM** La animación de la aplicación tiene un alto consumo de memoria RAM cuando se inicia la animación. Éste consumo es proporcional al número de formas geométricas presentes en pantalla, para una memoria de 8G, el número máximo de formas geométricas está entre las 18000 y 20000, una vez se supera este limite la aplicación se cierra.

Como resultado de estas condiciones se crean dos condicionen:

- La altura máxima de los tallos es de 100cm.
- Máximo se podrán generar 20 macollos.



Como se observa en la Figura 5.1 con un recuadro rojo, se indica el apartado en donde se puede realizar modificaciones de las variables ambientales (Humedad y Temperatura) y densidad de siembra por medio de un scroll de barra horizontal. También se puede seleccionar entre modelo y reconstrucción. Para seleccionar modelo las opciones de “Modelo” y “Fractal” deben estar activadas, y para elegir la opción de reconstrucción, se debe seleccionar solo “Fractal”. Después de configurar estas opciones, se procede a ejecutar el código y en seguida se desplegará una ventana de PlantGL, en esta ventana se podrá visualizar la animación del crecimiento de la planta de arroz.

## 5.2. Descripción de la pruebas

Las pruebas realizadas se compararon con imágenes encontradas en internet e imágenes tomadas por el grupo del proyecto "Sistema de captura de datos morfológicos mediante análisis de imágenes durante el crecimiento de plantas de arroz", también se compararon los resultados con información de la Sección 2.3.

Teniendo en cuenta las limitaciones dadas en la Sección 4.5 y la estructura del algoritmo descrito en la Sección 4.2 se crearon dos tipos de pruebas, de modelado y de reconstrucción.

**Pruebas de animación** Las pruebas de animación se realizaron ejecutando el programa y observando que el crecimiento de la planta se ve de forma natural, que los órganos de la planta están saliendo en el orden y lugar adecuado, como evidencia de las pruebas de animación se realizaron videos.

**Pruebas de reconstrucción** Para las pruebas de reconstrucción se uso información tomada por el grupo del proyecto "Sistema de captura de datos morfológicos mediante análisis de imágenes durante el crecimiento de plantas de arroz", estos datos se recibieron por medio de un archivo json, con datos obtenidos de una planta de arroz X, el resultado de la reconstrucción se compara con las fotografías que se usaron para obtener los datos.

**Pruebas de modelado** Las pruebas de modelado se hicieron variando las condiciones ambientales que se decidieron usar, para crear diferentes resultados de la simulación teniendo en cuenta lo descrito en la Sección 3.1.2, para constatar que estas reglas se implementaron correctamente. Para el factor de humedad se considero que la humedad del suelo óptima esta entre los 60 % y 80 % ya que no se encontraron datos acerca de los valores óptimos. Por eso este rango se dejo marcado como variable para que pueda cambiarse con facilidad.

### 5.3. Resultados de las pruebas

#### 5.3.1. Modelo de las partes de la planta

**Hojas** Usando lo descrito en la Sección 4.3 se usaron las curvas de Bézier de la Figura 5.2, donde la curva **a** describe la forma que toma la hoja al crecer, la curva **b** describe el contorno de la hoja, basándose en la forma en que varía el ancho de la hoja a lo largo de la lamina, y la curva **c** que describe la forma del corte transversal de la hoja.

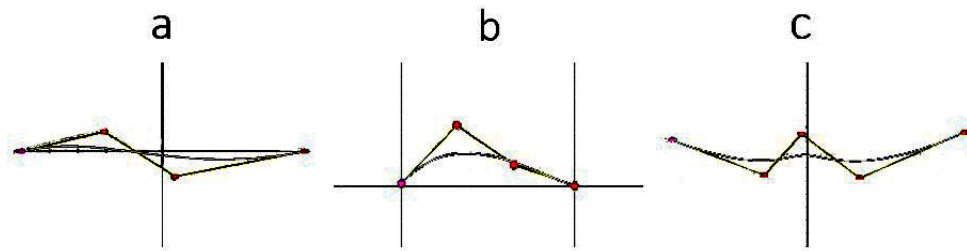


Figura 5.2: Curvas de Bézier usadas para el modelo de la lamina de las hojas.

El resultado obtenido se muestra en la Figura 5.3 donde el resultado de la Figura **a** muestra el resultado de la curva **a**, la Figura **b** muestra la forma de la hoja y la Figura **c** muestra el corte transversal de la hoja.

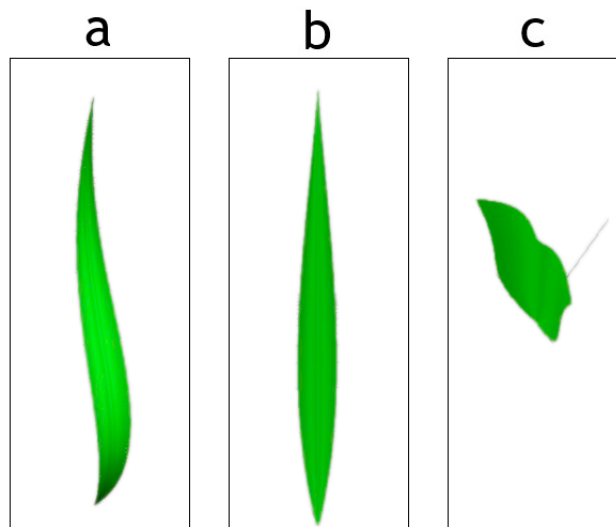


Figura 5.3: Modelo de las hojas.

**Nodos** En la Figura 5.4 se puede observar la comparación del modelo realizado para representar los nodos de la planta con la fotografía de un nodo.



Figura 5.4: Comparación del modelo de nodo con imagen de un nodo real.

**Tallo** En la Figura 5.5 se observa el resultado de modelar el tallo de la planta usando lo descrito en la Sección 2.4.2, en la figura se observa que el tallo está formado por nodos e internodos de manera intercalada, también se puede observar que el grosor de los internodos va disminuyendo ascendente, mientras que la longitud de estos va aumentando como se describe en la Sección 1.1.1.

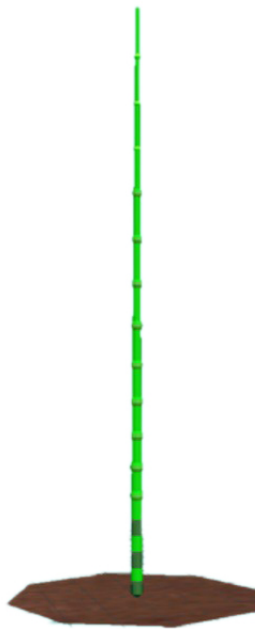


Figura 5.5: Modelo de tallo.

### 5.3.2. Resultados de la animación

Para las pruebas de animación se usaron diferentes condiciones, se pudo observar que la fluidez iba disminuyendo conforme se iban creando mas figuras geométricas, por lo tanto, el tiempo de crecimiento en la simulación no podría tener una equivalencia al tiempo de crecimiento real, ya la duración de cada ciclo era diferente, los primeros ciclos tenían la duración que se asignó en OpenAlea (0.93 s) con este tiempo la duración de la animación debería ser de 93 s (1 minuto y 33 segundos) en el caso con mayor altura y macollamiento, pero ya que el tiempo de los ciclos aumentaba a medida que la animación avanzaba, el tiempo de la animación fue de 390 s (6 minutos y medio).

En las Figuras 5.6 y 5.8, se observan algunos fotogramas de la animación del crecimiento de la planta. Para esta simulación se usaron valores de temperatura y humedad óptimos (tabla Table: prueba1), se obtuvo una altura de la planta de 100cm y un total de 20 macollos. En la Figura 5.6 se observan el desarrollo de las primeras hojas, de la planta, estos datos se obtuvieron de las mediciones del proyecto "Sistema de captura de datos morfológicos mediante análisis de imágenes durante el crecimiento de plantas de arroz".



Figura 5.6: Simulación de las primeras etapas.

En la Figura 5.7 se observa desde el inicio del macollamiento hasta el final de la etapa de ahijamiento, los datos de número de macollos, altura de la planta, largo de la lámina, ancho de las hojas y ángulo axial se obtuvieron usando las reglas morfológicas de la Sección 3.1.2 y las ecuaciones obtenidas en la Sección 2.4

El orden en que aparecen los macollos esta dado por la numeración que se describe en la Sección 2.4.2.



Figura 5.7: Simulación etapas de macollamiento.

El vídeo de la animación junto de la Figura 5.7 se encuentra disponible en la siguiente carpeta de Google Drive:

<https://drive.google.com/drive/folders/1wzSuOnouodyMPZOzC6cejxIIcYNVN71s?usp=sharing>

### 5.3.3. Pruebas de reconstrucción

Las pruebas de esta funcionalidad del código se hicieron de manera conjunta con el grupo del proyecto de captura de información morfológica o fenotípicas. Las pruebas consistieron en crear plantas virtuales usando la información obtenida por parte de este grupo de una planta real, para poder comparar la planta virtual y la real.

Para cada prueba se recibieron los siguientes datos:

- Largo de las hojas.
- Ancho de las hojas
- Altura a la que emergen las hojas
- Ángulo de las hojas

Debido a que las plantas que fueron usadas no tuvieron macollos, no se recibieron datos de número de macollos o el tamaño de estos.

**Prueba 1** Los resultados de esta prueba se pueden observar en la Figura 5.8, los datos tomados corresponden a la figura de la izquierda, esta planta de arroz de 117 días, cultivada por el grupo de captura de información morfológica y fenotípica. Esta planta contaba con 6 hojas, los datos que se recibieron son el largo de la lámina de las hojas, la altura del tallo en que salieron las hojas, el ancho de las hojas y el ángulo de las hojas con la horizontal (que se transformó en el ángulo axial), el ángulo de la hoja desde la parte superior fue determinado por el algoritmo.

En la parte derecha de la Figura 5.8 se puede observar el resultado de la reconstrucción. Se puede notar que la forma de las dos plantas es parecida y a simple vista, la reconstrucción conserva muchas características de la planta real, como el número de hojas, la posición de estas, su tamaño, y el tamaño total, esta última tuvo una variación de 0.5 cm, ya que, el tamaño real de la planta en ese momento era de 74.5 cm mientras que el tamaño total de la planta virtual es de 75 cm.

Una de las diferencias más notorias es el color, esto debido a que esta información no es tomada por parte del grupo de captura de información morfológica y fenotípica, por lo que el algoritmo al no tener esta información o la información ambiental pone un color verde por defecto para la planta

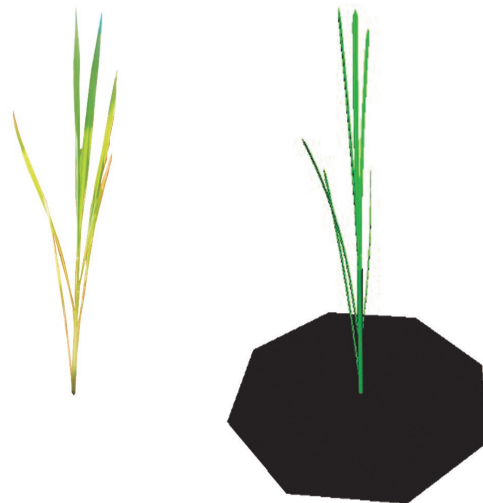


Figura 5.8: Prueba 1 reconstrucción de planta de arroz.

#### 5.3.4. Pruebas de modelado

Estas pruebas tienen como objetivo probar la funcionalidad del algoritmo a la hora de crear plantas con macollos, ya que esto no fue posible en las pruebas de reconstrucción debido a que las plantas que fueron usadas por parte del grupo de captura de información morfológica no tuvieron macollamiento.

Se crearon en total 11 ambientes con diferentes valores de temperatura, humedad de suelo y distancia entre plantas. La respuesta del algoritmo a los diferentes ambientes están determinados por las reglas morfológicas descritas en la Sección 3.1.2, que si bien podrían dar un resultado ambiguo son muy útiles para probar la funcionalidad del algoritmo.

<i>Prueba número 1</i>						
Condiciones					Resultados	
Temperatura Germinación	Temperatura Plántula	Temperatura Ahijamiento	Humedad del suelo	Distancia entre Plantas	Altura de la planta	Número de Macollos
24	29	29	65	26	100	20

Cuadro 5.1: Condiciones y resultados de la prueba 1.

El resultado del ambiente de pruebas se observa en las Figuras 5.6 y 5.8, este ambiente produce una planta de arroz ideal, con la mayor altura y número de macollos que se pueden ejecutar en los equipos usados para el desarrollo del proyecto, según lo descrito en la Sección 4.5.

El resultado de esta prueba es una planta de arroz sin rastro de marchitamiento en sus hojas, tiene aproximadamente 200 hojas y 20 macollos (el número de hojas no es el mismo en todos los macollos).

<i>Prueba número 2</i>						
Condiciones					Resultados	
Temperatura Germinación	Temperatura Plántula	Temperatura Ahijamiento	Humedad del suelo	Distancia entre Plantas	Altura de la planta	Número de Macollos
9	12	15	65	25	0	0

Cuadro 5.2: Condiciones y resultados de la prueba 2.

En esta prueba, las condiciones seleccionadas impidieron la germinación de la planta. Por lo tanto, en la Figura 5.9 no se observa el surgimiento de la planta.



Figura 5.9: Resultado Prueba 2.

<i>Prueba número 3</i>						
Condiciones					Resultados	
Temperatura Germinación	Temperatura Plántula	Temperatura Ahijamiento	Humedad del suelo	Distancia entre Plantas	Altura de la planta	Número de Macollos
12	12	15	65	25	5	0

Cuadro 5.3: Condiciones y resultados de la prueba 3.

El resultado de la prueba tres que se observa en la Tabla 5.3, representa una condición desfavorable, para el crecimiento de la planta debido a las bajas temperaturas, como se observa en la Figura 5.10 , la planta germinó y creció hasta obtener tres hojas pero debido a las bajas temperaturas las hojas empezaron a tomar un color blanco hasta que finalmente la planta dejó de crecer.



Figura 5.10: Resultado Prueba 3.

<i>Prueba número 4</i>						
Condiciones					Resultados	
Temperatura Germinación	Temperatura Plántula	Temperatura Ahijamiento	Humedad del suelo	Distancia entre Plantas	Altura de la planta	Número de Macollos
14	15	15	65	25	83	9

Cuadro 5.4: Condiciones y resultados de la prueba 4.

Bajo las condiciones descritas en la Tabla 5.4, se obtiene como resultado la planta que se observa en la Figura 5.11. Esta planta tiene una altura de 83 cm y tan solo presenta 9 macollos. Además, se puede observar que presenta decoloración en sus hojas, ya que han empezado a tomar un tono amarillento.

Algo adicional que no se puede observar en la imagen, es que esta planta tuvo un crecimiento lento en comparación a la planta de la prueba 1, esto debido a las bajas temperaturas.



Figura 5.11: Resultados Prueba 4.

<i>Prueba número 5</i>						
Condiciones					Resultados	
Temperatura Germinación	Temperatura Plántula	Temperatura Ahijamiento	Humedad del suelo	Distancia entre Plantas	Altura de la planta	Número de Macollos
17	18	18	65	25	99	10

Cuadro 5.5: Condiciones y resultados de la prueba 5.

En la Figura 5.12, se observa el crecimiento de la planta bajo las condiciones descritas en la prueba cinco. Como se puede mirar, las condiciones no son óptimas, aun así la planta logro crecer hasta obtener una altura de 99 cm y contar con 10 macollos, se observa que la planta presenta un color verde en sus hojas y tallo.



Figura 5.12: Resultados Prueba 5.

<i>Prueba número 6</i>						
Condiciones					Resultados	
Temperatura Germinación	Temperatura Plántula	Temperatura Ahijamiento	Humedad del suelo	Distancia entre Plantas	Altura de la planta	Número de Macollos
17	18	18	50	30	90	7

Cuadro 5.6: Condiciones y resultados de la prueba 6.

Como se observa en la Figura 5.13, bajo las condiciones de crecimiento descritas en la Tabla 5.6, se obtiene un resultado similar al obtenido en la prueba número cinco, ya que sus condiciones de temperatura son similares. Aun así, en el caso de prueba número seis el valor de humedad del suelo está por debajo del valor óptimo, esto ocasiona que la punta de las hojas tome un color blanco, además, el número de macollos es menor (solo 7).



Figura 5.13: Resultados Prueba 6.

<i>Prueba número 7</i>						
Condiciones					Resultados	
Temperatura Germinación	Temperatura Plántula	Temperatura Ahijamiento	Humedad del suelo	Distancia entre Plantas	Altura de la planta	Número de Macollos
24	29	29	65	10	99	5

Cuadro 5.7: Condiciones y resultados de la prueba 7.

En la prueba número siete la distancia entre plantas es de tan solo 10 cm, como se observa en la Tabla 5.7. Por lo que el macollamiento se vera reducido. Así como se mira la Figura 5.14 la planta tiene un macollamiento bajo, ya que cuenta solo con 5 macollos, las demás condiciones de la planta son buenas, ya que no presenta signos de marchitamiento o puntas blancas.

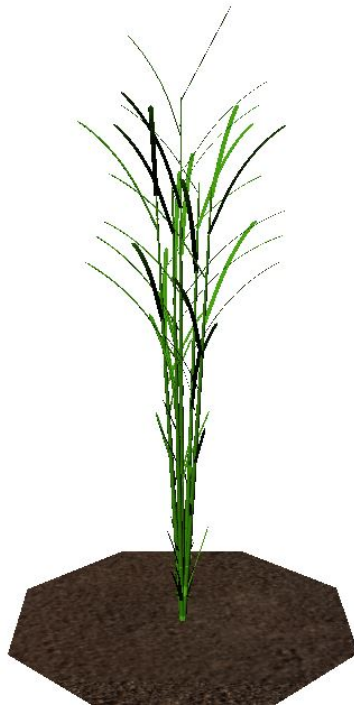


Figura 5.14: Resultados Prueba 7.

<i>Prueba número 8</i>						
Condiciones					Resultados	
Temperatura Germinación	Temperatura Plántula	Temperatura Ahijamiento	Humedad del suelo	Distancia entre Plantas	Altura de la planta	Número de Macollos
19	15	15	50	25	100	9

Cuadro 5.8: Condiciones y resultados de la prueba 8.

En la prueba número ocho la distancia entre plantas aumenta a 25 cm, como se observa en la Tabla 5.8 por lo que el macollamiento se vera aumentado con respecto a la prueba siete, como se observa en la Figura 5.15 la planta tiene un macollamiento alto, ya que cuenta con 9 macollos, también se puede observar decoloramiento en distintos órganos de la planta. Esto, debido a las condiciones de temperatura y humedad mostradas en la Tabla 5.8.



Figura 5.15: Resultados Prueba 8.

<i>Prueba número 9</i>						
Condiciones					Resultados	
Temperatura Germinación	Temperatura Plántula	Temperatura Ahijamiento	Humedad del suelo	Distancia entre Plantas	Altura de la planta	Número de Macollos
19	15	15	55	25	100	10

Cuadro 5.9: Condiciones y resultados de la prueba 9.

Los valores de la Tabla 5.10 son similares a los del la Tabla 5.9. Por lo tanto el resultado es similar, aunque como la humedad del suelo es ligeramente mayor, en la Figura 5.16 el marchitamiento de las hojas es menor.



Figura 5.16: Resultados Prueba 9.

<i>Prueba número 10</i>						
Condiciones					Resultados	
Temperatura Germinación	Temperatura Plántula	Temperatura Ahijamiento	Humedad del suelo	Distancia entre Plantas	Altura de la planta	Número de Macollos
19	16	12	45	25	99	9

Cuadro 5.10: Condiciones y resultados de la prueba 10.

En la Figura 5.17 se observa los resultados a las condiciones de la Tabla 5.17. Se puede mirar que las condiciones en el crecimiento de la planta hicieron que esta presentara marchitamiento en las hojas, ya que la mayoría presentan un color amarillo, además se observa un macollamiento bajo (9).



Figura 5.17: Resultados Prueba 10.

## 5.4. Discusión de los resultados

Evaluar la animación del crecimiento de la planta de arroz, resulta bastante complicado debido a que no se tiene un punto de comparación, el crecimiento de los macollos está determinado por lo descrito en la Sección 2.4. Aun así, del aspecto de la animación hay varios factores que se pueden

mejorar, como, por ejemplo:

- Mejorar el preprocesamiento podría permitir tener una animación más fluida, especialmente en la etapa de ahijamiento.
- Las pruebas de modelado, presentadas en la sección 5.3.4, demostraron que el algoritmo es capaz de crear plantas con diferentes características de macollamiento y color, aun así, estos detalles pueden mejorarse profundizando en la investigación de la respuesta de la planta de arroz bajo diferentes circunstancias y con más variables presentes en el ambiente.
- Mejorar la transición de colores daría un tono más realista al crecimiento de la planta.
- Optimizar el código en general, de esta manera se puede aumentar texturas y detalles de la animación. Ya que, en el estado actual, aumentar detalles en las texturas provoca el cerrado inmediato del programa. Esto debido a los recursos computacionales que utiliza la herramienta OpenAlea.
- Para lograr un estado más real de la animación, cargar diferentes tipos de texturas en los órganos de la planta, dependiendo de las condiciones medioambientales.

Respecto al modelado de las plantas, se pudo determinar que el resultado es el esperado respecto a lo que se programó en el algoritmo y las reglas morfológicas obtenidas. Aun así, se considera que el resultado puede mejorar, para esto es necesario mejorar algunos aspectos. En primer lugar, se podría mejorar el proceso de análisis y entendimiento de la morfología de la planta para lograr un modelo más cercano a la realidad, agregando más reglas de crecimiento y factores ambientales. Otro de los factores que puede ayudar a mejorar el resultado final, consiste en reducir las limitaciones que se presentan frente al número de macollos y tamaño de la planta, esto se podría conseguir aumentando las capacidades de procesamiento y memoria del equipo en el que se vaya a trabajar, y adicionalmente realizando una optimización del código.

# Conclusiones

---

## 6.1. Conclusiones

En este proyecto de grado se implementó un sistema para modelar en 3D el crecimiento de la planta de arroz que permite reconstruir la morfología de la planta de arroz en diferentes etapas de crecimiento, usando información fenotípica recibida y reglas de crecimiento basadas en factores climáticos. Esto permite analizar el crecimiento de la planta bajo diferentes ambientes, también ayuda a crear una reconstrucción virtual 3D de una planta real lo que ayudaría a analizar una planta a distancia o almacenar los datos de esta en un determinado momento.

En este trabajo de grado se realizó un proceso de investigación que tenía como objetivo comprender el proceso de crecimiento de la planta de arroz, lo que incluye su estructura, los órganos de la planta, su ubicación, la etapa de crecimiento en que aparecen y la relación entre ellos. Esto fue de vital importancia para el proyecto ya que la información obtenida acerca de la morfología del arroz es la base para la selección del modelo crecimiento, así como de las herramientas que se usaran para la implementación del modelo y la animación del crecimiento de la planta y la selección de reglas de crecimiento.

En este proyecto de grado se seleccionó un modelo morfológico basado en sistemas L para representar el crecimiento de arroz, el modelo seleccionado fue el obtenido por Watanabe [4], este modelo no solo sirve para representar el crecimiento de la planta de manera general, sino que se tiene un modelo de crecimiento de tallos y hojas, ya que lo presentado en [4] se compone de funciones que representan las características de las hojas respecto a su posición nodal y también el crecimiento de los diferentes macollos según su orden y lugar de salida.

Para la selección del modelo se tuvo en cuenta el objetivo general del proyecto y que su implementación permita recibir datos tomados de una planta real para lograr la representación de esta.

En la selección del programa y lenguaje para la implementación del algoritmo se tuvieron en cuenta factores como, los requerimientos necesarios de procesador y memoria, la facilidad de implementar el modelo seleccionado y que se pudiera recibir datos de manera externa.

Se evaluaron diferentes programas y finalmente se decidió trabajar con OpenAlea, un proyecto de código abierto basado en Python, ya que es un programa dirigido especialmente a la comunidad de investigación en plantas, cuenta con herramientas y bibliotecas que facilitan la implementación de modelos arquitectónicos de las plantas, contando con un módulo basado en sistemas L y un módulo

especial para la animación de la planta.

En este trabajo de grado se seleccionó e implementó un método eficaz para la comunicación con el proyecto “Sistema de captura de datos morfológicos mediante análisis de imágenes durante el crecimiento de plantas de arroz” y así poder recibir los datos morfológicos.

Se realiza una investigación acerca de distintas maneras de comunicar los dos proyectos, se considera que JSON es la opción adecuada, debido a las ventajas ya mencionadas durante este proyecto de grado. Su formato ligero de intercambio de datos y fácil comprensión a la hora de generar algoritmos, ayudo a establecer la comunicación requerida entre las dos fases del proyecto y de esta manera, recibir los datos morfológicos obtenidos en la fase de captura. Debido a la cantidad de datos procesados, la simulación presentó problemas de tiempo al graficar la simulación, por lo que se vió la necesidad de realizar un preprocesamiento. Esto con el fin de ganar reducción en los tiempos de simulación del crecimiento de la planta de arroz.

En este proyecto de grado se desarrolló un algoritmo que permite el modelado y reconstrucción 3D de la planta a partir de determinadas variables morfológicas y ambientales dependiendo el caso. El algoritmo presenta dos opciones:

El modelado de la estructura vegetal, que permite recrear el crecimiento de la planta de arroz bajo determinadas condiciones ambientales, teniendo en cuenta reglas de crecimiento obtenidas por un proceso investigativo, esta opción crea una animación 3D de la planta de arroz desde su germinación hasta la finalización de la etapa de macollamiento, variando, en función del valor de las variables seleccionadas, el número de macollos, la altura de la planta, el número de hojas o el color de estas. La reconstrucción no hace uso de las reglas de crecimiento basadas en factores climáticos, sino que recrea el crecimiento de una planta con valores morfológicos enviados desde el proyecto “Sistema de captura de datos morfológicos mediante análisis de imágenes durante el crecimiento de plantas de arroz”. Con estos datos se crea una planta virtual en 3D con características similares a la planta real, esto puede ser útil almacenar datos de una planta o para analizarla de manera remota.

El algoritmo está construido de manera modular, para que sea más fácil editarlo, por motivos de procesamiento y hacer que la animación sea más fluida, ya que cuenta con un módulo de preprocesamiento que ejecuta las funciones necesarias para obtener los datos morfológicos que se necesitan para el modelo y de esta manera evitar que cada ciclo de animación se tenga que realizar demasiadas operaciones, causando una animación poco fluida y aumentando el porcentaje de recursos del PC que la aplicación usa.

Al finalizar el algoritmo, los resultados obtenidos se evaluaron comparándolos con imágenes y videos de plantas de arroz obtenidas de internet. Para el caso de modelado, los datos también se compararon con la información encontrada en la “Guía para identificar las limitaciones de campo en la producción de arroz “[15] y en el "Manual de buenas practicas agrícolas para cultivos de arroz"[32]. De esta manera se obtuvieron los resultados esperados respecto a lo que el algoritmo debería hacer, pero para validar el alcance real del proyecto en este sentido es necesario profundizar en el estudio de

la morfología de la planta y poder realizar comparaciones con plantas reales sometidas a diferentes condiciones ambientales para observar su respuesta.

Respecto a la función de reconstrucción de la planta, el resultado de las pruebas muestra un gran parecido a la planta real. Aún así, es necesario hacer una evaluación de esta funcionalidad con plantas complejas, ya que las plantas de las que se pudo hacer seguimiento no desarrollaron macollos por lo que no se pudo probar este aspecto, a pesar de que si está programado dentro del algoritmo.

# Trabajos Futuros

---

## 7.1. Trabajos futuros

Los trabajos futuros pueden involucrar el modelado de la fase reproductiva de la planta de arroz, para esto es necesario realizar una profundización en el estudio de la fase reproductiva y todos los órganos que aparecen en esta fase, como se desarrollan, que factores los afecta y de que manera.

Para la unión compacta de las dos fases del proyecto, hacer que la transferencia de datos sea de manera autónoma es algo esencial en proyectos futuros. Para ello, JSON debido a su manera de intercambio de datos se puede lograr la reconstrucción de la planta de manera autónoma y en tiempo real. Esto trae grandes ventajas, como la representación del modelo 3D en un determinado instante de tiempo, logrando obtener este modelo de manera inmediata.

Otro avance importante que se podría implementar para mejorar la opción de modelado, usando como referencia el algoritmo actual, es la creación de más reglas de crecimiento basadas en los factores climáticos, esto permitirá que la precisión del modelo sea mayor y se puedan hacer estimaciones más exactas del crecimiento de la planta. Para realizar esta mejora se podría desarrollar un proyecto paralelo en el que se experimente con el crecimiento de la planta bajo diferentes condiciones y usar los resultados de esta investigación para crear las nuevas reglas de crecimiento. Con las implementaciones anteriores el siguiente paso es poder implementar un módulo que reciba datos relacionados al clima como por ejemplo las bases de datos del IDEAM o usando softwares como CLIMWAT [33].

Finalmente, para aprovechar al máximo OpenAlea se podría usar el módulo de Alinea para crear simulaciones de cultivos completos apoyándose en otro tipo de modelos, que permitan medir rendimiento, como es el caso del conjunto de software y modelos de DSSAT y con esto poder obtener información adicional del cultivo y crear un modelo más preciso, ya no de una planta sino de un cultivo completo.

Para la opción de reconstrucción, a partir del programa actual, se podría implementar un módulo que reciba la información morfológica y fenotípica de una planta en tiempo real, para esto es necesario un estrecho trabajo colaborativo con el grupo encargado de tomar estos datos y desarrollar una forma de conexión para el envío de datos entre el sistema de captura y el sistema de modelado 3D.

# Bibliografía

- [1] Olmos S. *Apunte de morfología, fenología, ecofisiología, y mejoramiento genético del arroz*. UNNE, Argentina, 2007.
- [2] *Crecimiento y desarrollo de la planta de arroz*. Universidad Católica de Chile, s.f.
- [3] Arregoces O. *Morfología de la Planta de Arroz*. Centro Internacional de Agricultura Tropical, 2005.
- [4] Romm P. Hasegawa T. Nakagawa H. Takahashi W. Watanabe T., Hannan J. *Rice Morphogenesis and Plant Architecture: Measurement, Specification and the Reconstruction of Structural Development by 3D Architectural Modelling*. Annals of botany, 2005.
- [5] Universidad de los Andes Universidad del Quindío Universidad de Ibagué Univaersidad de los Llanos CIAT Cenicaña Fedearroz California Institute of Technology Pontificia Universidad Javeriana, ICESI. *OMICAS: Optimización multiescala insilico (infraestructura y validación en arroz y caña de azúcar)*. Colombia Científica, 2018.
- [6] FAO. *La agricultura mundial en la perspectiva del año 2050*. Foro de expertos de alto nivel, 2009.
- [7] Loboguerrero A. *Productividad de la tierra y desarrollo del sector agropecuario medido a través de los indicadores de crecimiento verde en el marco de la misión de crecimiento verde en Colombia*. CRECE, 2017.
- [8] Roger Enrique Charry . Víctor Degiovanni, Luis Eduardo Berrío. *Producción eco-eficiente del arroz en América Latina*. CIAT, 2010.
- [9] Rodríguez H. Salas R. Velázquez J., Rosales A. *Determinación de las etapas de inicio de macollamiento, inicio de primordio, floración y madurez en la planta de arroz con el sistema s, v y r correlacionado con la sumatoria térmica*. Universidad de Costa Rica, Costa Rica, 2015.
- [10] Muñoz C. *Introducción a los sistemas de Lindenmayer: fractales, autómatas celulares y aplicaciones*. Universidad Nacional Autónoma de México, 2011.
- [11] Peñas J. Reyero L. *JSON language oriented processing*. Universidad Complutense Madrid, 2012.
- [12] Campos D. *Introducción a los sistemas L*. Universidad Autónoma de Puebla, 2011.
- [13] Cokalaer T. Dufour-Kowalski S. Godin C. Boudon F., Pradal C. *OpenAlea: a visual programming and component-based software platform for plant modelling*. CSIRO PUBLISHING, 2008.

- [14] Cokalaer T. Prusinkiewicz P. Godin C. Boudon F., Pradal C. *L-Py: an L-system simulation framework for modeling plant architecture development based on a dynamic language*. Plant Sci., 2012.
- [15] R.C. Chaudhary J.S. Nanda D.V. Tran. *Guía para identificar las limitaciones de campo en la producción de arroz*. Comisión internacional del arroz organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación, 2003.
- [16] T. Chang EA. Bardenas. *The morphology and varietal characteristics of the rice plant*. Technical Bulletin 4, 1965.
- [17] A Lindenmayer. *Modelos matemáticos para interacciones celulares en desarrollo*. Journal of Theoretical Biology, 1968.
- [18] P. Prusinkiewicz A Lindenmayer. *La belleza algorítmica de las plantas*. Springer-Verlag., 1990.
- [19] Stevens F. Donoghue J. Judd S., Campbell. *Poaceae*. Plant systematics: a phylogenetic approach, 2002.
- [20] W. Jones S. Royce D. Villegas, O. Daza. *CASUPRO: An industry-driven sugarcane model*. Springer-Verlag., 2005.
- [21] CH Porter KJ Boote V. Shelia PW Wilkens U.S Singh JW White S. Asseng JI Lizaso LP Moreno W. Pavan R. Ogoshi LA Hunt GY Tsuji JW Jones. Hoogenboom, G. *El ecosistema de modelado de cultivos DSSAT*. Burleigh Dodds Science Publishing, 2019.
- [22] G. Hoogenboom CH Porter KJ Boote WD Batchelor LA Hunt PW Wilkens U. Singh AJ Gijssman JT Ritchie Jones, JW. *Modelo de sistema de cultivo DSSAT*. Revista europea de agronomía, 2003.
- [23] Fundación DSSAT. Componentes del modelo dssat. [urlhttps://dssat.net/models-overview/components/](https://dssat.net/models-overview/components/), 2020.
- [24] P. Vargas. *Producción eco-eficiente del arroz en América Latina*. CIAT, 2010.
- [25] SAG. *Manual técnico para el cultivo de arroz. (Oryza sativa)*. Dirección de ciencia y Tecnología Agropecuaria(DICTA), 2003.
- [26] Ecma International. *The JSON Data Interchange Syntax*. Ecma International, 2017.
- [27] Blender Foundation. [www.blender.org/about/](http://www.blender.org/about/), 2002.
- [28] Microsoft. [docs.microsoft.com/es-es/visualstudio/get-started/visual-studio-ide?view=vs-2019/](https://docs.microsoft.com/es-es/visualstudio/get-started/visual-studio-ide?view=vs-2019/), 2019.
- [29] Microsoft. [docs.microsoft.com/en-us/visualstudio/designers/model-editor?view=vs-2019](https://docs.microsoft.com/en-us/visualstudio/designers/model-editor?view=vs-2019), 2018.

- [30] OpenAlea. [openalea.gforge.inria.fr/dokuwiki/doku.php?id=learnmore](http://openalea.gforge.inria.fr/dokuwiki/doku.php?id=learnmore), 2010.
- [31] F. Boudon. [lpy.readthedocs.io/en/latest/user/editor.html](http://lpy.readthedocs.io/en/latest/user/editor.html), 2021.
- [32] M. Paredes Becerra B. *Producción de Arroz: Buenas practicas agrícolas*. INIA, 2015.
- [33] FAO. Climwat. [urlhttp://www.fao.org/land-water/databases-and-software/climwat-for-cropwat/es/](http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/climwat-for-cropwat/es/), s.f.