



**UNIVERSIDAD AGRARIA DE LA HABANA
"FRUCTUOSO RODRÍGUEZ PÉREZ"
Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas
Unidad Científico Tecnológica de Base "Los Palacios"**

**Relación de los procesos fisiológicos del
desarrollo y de variables meteorológicas, con
la formación del rendimiento en el cultivo del
arroz (*Oryza sativa* L.) en Los Palacios,
Pinar del Río.**

Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Agrícolas

Ing. Lázaro A. Maqueira López

Mayabeque, 2014



**UNIVERSIDAD AGRARIA DE LA HABANA
"FRUCTUOSO RODRÍGUEZ PÉREZ"
Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas
Unidad Científico Tecnológica de Base "Los Palacios"**

**Relación de los procesos fisiológicos del
desarrollo y de variables meteorológicas, con
la formación del rendimiento en el cultivo del
arroz (*Oryza sativa* L.) en Los Palacios,
Pinar del Río**

Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Agrícolas

**Autor: Ing. Lázaro A. Maqueira López
Tutor: Dr.C. Walfredo Torres de la Noval**

Mayabeque, 2014



AGRADECIMIENTOS

Tal vez la tarea más difícil sea la de saber exactamente, al final de un trabajo, cuantas personas lo han hecho posible. Puede que en el caso de este, sea más compleja aún, porque desde que se montó el primer experimento hasta el final, son muchos los compañeros que nos brindaron su ayuda generosa. Aunque de cierta manera y muy sutilmente, también existieron quienes pusieron sus trabas. Corresponder a esta generosidad no puede ser fácil.

Cada vez que he pretendido un recuento de las personas a las cuales les debía agradecer sus concursos en aras del éxito de mi trabajo, he caído en olvidos involuntarios. No he querido ser injusto, ni olvidadizo, ni ingrato, dejo en estas líneas mi expresión de deuda eterna a todos, permitiéndome sólo puntualizar mi más profundo agradecimiento a los siguientes:

- ❖ A la Revolución Cubana, porque con su obra ha hecho posible mi formación.*
- ❖ Al gobierno de Japón por contribuir a mi preparación y al grupo de nipones que me acogieron calurosamente junto a los cubanos en el momento más difícil de mi vida, que me tocó pasarlo en esa tierra del sol naciente.*
- ❖ A mi abuelo, esposa y mi pequeño gigante Hansel Alberto Maqueira Herrera, que son artífices de todo lo logrado, puesto que me han brindado suficiente comprensión, paciencia, confianza y apoyo moral y espiritual en todos los momentos.*
- ❖ A toda mi familia, en especial a mis tíos Digna, Leandro, Alberto, Estela, Felicia, Ignacio, Juana, Hilario, Ismael y Paula, y mis primos Derlin, Yasiel, Yaniel, Disniel, Odalis, Hilarito y Idabelsis; por su constante preocupación y ayuda brindada.*
- ❖ A mis grandes amigos, Samuel, Kirenia, Mercedes, Osmany y Mairelis, por compartir siempre conmigo momentos buenos y malos, por esa preocupación constante y apoyo incondicional.*
- ❖ A la Dr. C. Miriam Núñez Vázquez por brindarme todo el apoyo necesario en la ejecución de este trabajo y por sus grandes aportes, los que fueron decisivos en la culminación feliz del mismo.*
- ❖ A los compañeros, Dr. C. Aymara García López, Dr. C. Adriano Cabrera Rodríguez, Dr. C. Eduardo Ortega Delgado, Dr. C. Eduardo Jerez Mompie, Dr. C. Ramiro Valdés Carmenate, Dr. C. Francisco Soto Carreño, Dr. C. René Florido Bacallao y Dr. C. Mario Varela Nualles que han dedicado parte de su preciado tiempo a la revisión y orientación de este trabajo y por sus valiosos consejos para la conformación final de este documento.*
- ❖ A los compañeros de las casitas Miriam, Deyanira, Anayza, Michel, Jaime, Guille, Gertrudis y todos los que permanecieron durante mi estancia, por compartir conmigo momentos de mucha tensión y por todo el apoyo brindado.*

AGRADECIMIENTOS

- ❖ *A los compañeros Rogelio Morejón Rivera, Dra C. Noraida de Jesús Pérez, Francisco Cuevas y Guillermo Díaz López por valiosos consejos y por dedicar parte de su preciado tiempo a la revisión de este trabajo y al Dr. Rodolfo Castro Menduiña por impulsar el trabajo en la UCTB Los Palacios desde sus inicios.*
- ❖ *A Edgardo Guevara por sus grandes aportes, la ayuda prestada y todos los consejos brindados desde el inicio de la investigación.*
- ❖ *A todos los trabajadores de la UCTB “Los Palacios” desde el grupo de servicios hasta el grupo de seguridad y protección, en especial al grupo de investigadores Ariel, Sandra, Félix, Fofito, Castell, Polón, Elizabeth, Migue, Tania y Alexander, también al grupo de técnicos sobre todo a Mireya, Higinio, Marta, Giselda, Mary, Yosleidi, Lazarita, Magdalena, Diolis, Mabel, Calcuta, Guille, Yoanki, entre, otros que fueron protagonistas de todo lo logrado.*
- ❖ *A los trabajadores del INCA por todo el cariño transmitido y porque de una forma u otra colaboraron en este trabajo, sobre todo a Emilia, Yolanda, Sucel, María, Flora, Lisbeth, Inés, los muchachos de comercialización entre otros.*
- ❖ *A una persona realmente admirable, que no por estar en el final de estas páginas resulta el menos importante, al contrario, es solo que realmente no existen palabras para poder resaltar a quien es verdaderamente para mí un excelente compañero, amigo, padre y tutor, Dr. C. Walfredo Torres de la Noval, por guiarme con pasos firmes en la marcha del trabajo y en mi desarrollo profesional. Gracias por tanta dedicación, comprensión y sobre todo paciencia. Sé que quizás en algunos momentos le resultó difícil convencerme de algunos cambios o nuevas propuestas en el trabajo desarrollado, pero créame que siempre di lo mejor de mí para poder lograrlo. Solo me queda darle gracias a Dios por haber permitido que una persona tan exigente pero a la vez tan solidaria y colmada de tantos valores muy positivos, tuviera a su cargo mi preparación profesional. Espero no defraudarlo nunca y continuar mi trabajo inspirado en su ejemplo como profesional.*

Gracias por todo, y a todos, mi eterna gratitud.



DEDICATORIA

*A la memoria de mi Madre Evangelina López Suárez:
Ofrezco este homenaje como testimonio de mis esfuerzos para
cumplimentar, aunque sea en algo, la magnitud de sus desvelos porque
a ella debo todo lo que soy.*

*A mi Hijo Hansel Alberto Maqueira Herrera:
Quien ha sido estímulo y razón para continuar mi obra.*

Citación correcta Norma ISO 690

Según Sistema de Referencia Numérico

1. Maqueira-López, Lázaro A. Relación de los procesos fisiológicos del desarrollo y de variables meteorológicas, con la formación del rendimiento en el cultivo del arroz (*Oryza sativa* L.) en Los Palacios, Pinar del Río. [Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias Agrícolas] Mayabeque: Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, Unidad Científico Tecnológica de Base “Los Palacios”, 2014.

Según Sistema de Referencia Apellido, año

Maqueira-López, Lázaro A. 2014. Relación de los procesos fisiológicos del desarrollo y de variables meteorológicas, con la formación del rendimiento en el cultivo del arroz (*Oryza sativa* L.) en Los Palacios, Pinar del Río. [Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias Agrícolas] Mayabeque: Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, Unidad Científico Tecnológica de Base “Los Palacios”

SÍNTESIS

En el cultivo del arroz (*Oryza sativa* L.), no existe suficiente información sobre el comportamiento de los procesos fisiológicos, meteorológicos y de su interacción, que influyen en la formación del rendimiento, con el fin de arribar a generalizaciones conceptuales que puedan adecuarse al comportamiento local de la especie y así desarrollar un manejo más eficiente. En el presente trabajo, se relacionaron los siguientes aspectos, con el rendimiento agrícola en la localidad de Los Palacios, para crear las bases del patrón general de su formación. A partir del comportamiento de los cultivares estudiados se demostró que la duración real de los ciclos de desarrollo de los cultivares de arroz, varían en función de la fecha de siembra, atendiendo a las particularidades del comportamiento de la temperatura del aire en la localidad, y el rendimiento de las plantas se relaciona de manera diferencial con la duración de las últimas fases de desarrollo en dependencia de la época de siembra, “poco lluviosa” y “lluviosa”. Este además se relacionó con las variables del crecimiento afines con la superficie foliar y de manera negativa, en la época lluviosa, con las velocidades de desarrollo del Índice de Área Foliar y la máxima masa seca total. Los cultivares alcanzaron bajos índices de la Eficiencia del Uso de la Radiación y fue posible predecir a partir del coeficiente fototérmico, el comportamiento de la magnitud del sumidero principal de las plantas. La relación fuente-sumidero resultó diferente para cada época y las limitaciones, se encuentran en la fuente y en menor grado en el sitio de consumo. Se determinó la brecha existente entre el rendimiento alcanzado y el potencial de los cultivares en la localidad. Se logra un esquema bioclimático para la formación del rendimiento en dependencia de la época de siembra, que integra aspectos relacionados con la temperatura, la radiación solar, el desarrollo fenológico y variables del crecimiento.

TABLA DE CONTENIDO

CONTENIDO	pág.
1. INTRODUCCIÓN.	1
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.	7
2.1 Generalidades sobre el cultivo del arroz.	7
2.1.1. Taxonomía y origen.	7
2.1.2. Importancia del cultivo.	8
2.1.3. Perspectivas de la producción y el comercio del arroz en el mundo.	9
2.2 Formación del rendimiento y sus componentes.	10
2.2.1. Formación del rendimiento.	10
2.2.2. Rendimiento Potencial.	14
2.2.3. Estimación del rendimiento potencial.	16
2.3 Aspectos del desarrollo de la planta de arroz	19
2.3.1. Fase Vegetativa.	19
2.3.2. Fase Reproductiva.	20
2.3.3. Fase de Maduración.	21
2.4 Influencia de la temperatura y la radiación solar sobre el desarrollo y la fisiología de la planta de arroz.	21
2.4.1. Efecto de la Temperatura.	21
2.4.2. Efecto de la radiación luminosa	23
2.5 Análisis del crecimiento de las plantas	25
2.5.1. Variables primarias del análisis del crecimiento	26
2.5.1.1. Acumulación de biomasa	27
2.5.1.2. Superficie foliar	28
2.5.1.3. Índice del Área Foliar (IAF)	29
2.5.1.4. Duración del Área Foliar (DAF)	31
2.5.2. Índices del análisis del crecimiento	32
2.5.2.1. Tasa Absoluta de Crecimiento (TAC)	32
2.5.2.2. Tasa de Asimilación Neta (TAN)	33
2.5.3. Métodos para desarrollar el análisis del crecimiento	35
2.6 Relación fuente-sumidero.	36
2.6.1. Distribución y movilización de los fotoasimilatos en las plantas.	36
3. MATERIALES Y MÉTODOS.	41
Condiciones experimentales generales.	41
3.1 Evaluación del rendimiento agrícola y sus componentes.	43
3.2 Desarrollo fenológico, respuesta a la temperatura y determinación de los grados días de calor acumulados para el desarrollo de las fases.	43
3.2.1. Duración de las fases fenológicas de los cultivares estudiados.	44
3.2.2. Influencia de la temperatura en la duración de las fases fenológicas.	44
3.2.3. Grados días de calor acumulados para el desarrollo de cada fase y etapa.	44
3.3 Evaluación del crecimiento de las plantas y relación con las variables meteorológicas.	45

3.3.1.	Dinámicas del crecimiento de cuatro cultivares de arroz en diferentes fechas de siembra y épocas.	45
3.3.2.	Coeficiente fototérmico y la eficiencia del uso de la radiación.	46
3.4	Exportación de asimilados durante el desarrollo del grano desde los órganos vegetativos de la planta.	48
3.5	Estimación del rendimiento potencial para el cultivo del arroz en la localidad de Los Palacios y modelo bioclimático para la formación del rendimiento.	50
3.6	Análisis estadístico y manejo de datos	51
4.	RESULTADO Y DISCUSIÓN	52
4.1	Evaluación del rendimiento agrícola y sus componentes.	52
4.2	Desarrollo fenológico, respuesta a la temperatura y determinación de la temperatura acumulada para el desarrollo de las fases.	55
4.2.1.	Duración de las fases fenológicas de los cultivares estudiados.	55
4.2.2.	Influencia de la temperatura en la duración de las fases fenológicas.	59
4.2.3.	Grados días de calor acumulados para el desarrollo de cada fase y etapa.	61
4.3	Evaluación del crecimiento de las plantas y relación con las variables meteorológicas.	63
4.3.1.	Dinámicas del crecimiento de cuatro cultivares de arroz en diferentes fechas de siembra y épocas.	63
4.3.2.	Dependencia del rendimiento del crecimiento del cultivo	72
4.3.3.	Coeficiente fototérmico y la eficiencia del uso de la radiación	77
4.4	Exportación de asimilados durante el desarrollo del grano desde los órganos vegetativos de la planta.	83
4.5	Estimación del rendimiento potencial para el cultivo del arroz en la localidad de Los Palacios y modelo bioclimático para la formación del rendimiento.	91
5.	CONCLUSIONES	97
6.	RECOMENDACIONES	99
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	
8.	ANEXOS	



INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

El arroz (*Oryza sativa* L.), es uno de los cereales de mayor consumo y es la fuente de alimento principal para más de la mitad de la población mundial después del trigo (Ruiz *et al.*, 2005; Acevedo *et al.*, 2006; Álvarez *et al.*, 2008; Canfalonieri *et al.*, 2011). En Cuba, forma parte de la dieta básica de la población y el país es de los más altos consumidores de América Latina; con valores de alrededor de 72 kg per cápita por año (Polón *et al.*, 2012). Hasta el momento, según destacan estos autores, la producción nacional sólo satisface un poco más del 50 % de las necesidades y éstas se completan con importaciones.

La política varietal en el país la integran más de 20 cultivares de la especie, que presentan dificultades para expresar su máximo potencial productivo, y el rendimiento agrícola promedio se mantiene cercano a las 3 t.ha⁻¹, inferior a la media mundial (ONEI, 2014). Los bajos rendimientos se deben al bajo aprovechamiento del período óptimo de siembra y problemas de manejo, el deterioro de las propiedades de los suelos, la política varietal y su desarrollo, la calificación y capacitación de los productores, además de las variaciones existentes en el clima (MINAG, 2011).

Las variaciones en el clima en los últimos años, resultan una de las causas fundamentales que ocasionan variabilidad en el rendimiento de muchos cultivos y especialmente en el arroz (Akinbile, 2013), por lo que el análisis de la interacción del comportamiento de los cultivares con las variables meteorológicas, resulta clave para crear las bases de las propuestas de manejo del cultivo a escala local, con el fin de incrementar los rendimientos. La agricultura actual tiende cada vez más a valorar la importancia del genotipo desarrollándose en un ambiente local, para lograr una

mayor eficiencia de la producción. En este sentido resulta de fundamental importancia, el conocimiento de los procesos y mecanismos que determinan el desarrollo y por consecuencia, el rendimiento biológico y el agrícola considerando, las variables meteorológicas que los influyen. Estos aspectos brindan información para hacer un uso más eficiente y adecuado de los insumos a emplear y guía al mejorador en la selección de cultivares de mayor potencial de rendimiento y más adaptados al ambiente.

Lo anterior se constituye en una acción de importancia atendiendo a que las condiciones de una determinada localidad; en particular el ambiente térmico y de radiación, fijan un techo de producción no superable con el incremento de insumos, y así se logra identificar cuáles son los períodos más críticos que determinan el rendimiento en las plantas cultivadas (Tao y Zhang, 2013).

Las técnicas de sensoramiento remoto, como el análisis de imágenes satelitales, han permitido avanzar en la explicación de la acción de los fenómenos climáticos en los cultivos (Schepers *et al.*, 2004; Hatfield *et al.*, 2008) y esta información, conjuntamente con los modelos de crecimiento, permite monitorear, simular y evaluar posibles escenarios productivos. Sin embargo, este análisis es de gran ayuda en evaluaciones globales, pero resulta de poca utilidad a escalas más pequeñas con un limitado conocimiento causal del comportamiento de los cultivos.

Los modelos de simulación actuales, aún adolecen de la incorporación de parámetros genéticos, fisiológicos o edáficos particulares, que expliquen la variabilidad de los rendimientos (Masutomi *et al.*, 2009; Iizumi *et al.*, 2009; 2012; Tao y Zhang, 2013). Para su utilización en Cuba, resulta necesario la cuantificación

de los parámetros fisiológicos en las distintas etapas del crecimiento del cultivo que expliquen y predigan el comportamiento del rendimiento (López *et al.*, 2009; 2010). En los estudios de la interacción genotipo-ambiente, el empleo de un alto número de tratamientos y ambientes productivos, limita la realización de estudios más detallados del desarrollo de las plantas en un ambiente específico.

Los trabajos realizados en Cuba con el fin de abordar la formación del rendimiento y su relación con el crecimiento y las variables meteorológicas en el cultivo del arroz resultan aislados. Se han evaluado los efectos de la época de siembra, diferentes densidades de siembra y niveles de fertilización nitrogenada sobre el desarrollo y rendimiento del cultivar IR-8 (Lerch *et al.*, 1972 a, b). En la década de los 80, Alfonso (1998) desarrolló investigaciones con el fin de establecer indicadores básicos para la selección de genotipos tolerantes a la sequía, en los que se tuvo en cuenta la duración de las fases fenológicas y se estableció que, el Índice de Área Foliar y la producción de masa seca de la parte aérea a partir del inicio de la floración, tenían una alta asociación con el rendimiento agrícola en condiciones de estrés hídrico. Posteriormente, Polón *et al.* (2003; 2006; 2012) señalaron al Índice de Área Foliar como un carácter fisiológico relacionado con el rendimiento. García *et al.* (2009; 2010), en condiciones semicontroladas, con el cultivar J-104, informaron que los cambios que ocurren en la partición de fotoasimilados pudieran tener una influencia positiva en el llenado de los granos y por ende, en el rendimiento agrícola.

Sin embargo, a pesar de todo lo anterior, resulta importante destacar la falta de estudios integrales, con un enfoque sistémico, para establecer la formación del rendimiento en el cultivo del arroz. Sobre todo, si se tiene en cuenta el cultivar, la

variabilidad climática existente en determinada localidad y su efecto en la productividad biológica y agrícola del cultivo, con el propósito de dar respuesta causal al comportamiento encontrado en el campo y, delinear acciones en función de mejorar la producción a través del diseño de prácticas de manejo a escala local. De esta forma, se contribuye al propósito de llevar a cabo tecnologías más eficientes por localidad.

Por todo lo antes expuesto, es que se lleva a cabo esta investigación partiendo de que no existe suficiente información sobre el comportamiento de los procesos fisiológicos, meteorológicos y de su interacción, que influyen en la formación del rendimiento del cultivo de arroz, y que permitan arribar a generalizaciones que puedan adecuarse al comportamiento de la especie a nivel de localidad y así desarrollar un manejo más eficiente de las plantaciones.

Teniendo en cuenta lo anterior, la hipótesis de trabajo fue: Las bases para el patrón general de la formación del rendimiento en el cultivo de arroz, se crean a partir de la relación que guarda el desarrollo de las plantas, el comportamiento de las variables meteorológicas y la productividad a escala local.

El **objetivo general** consistió en relacionar el desarrollo, el comportamiento de variables meteorológicas y la productividad, con el rendimiento de cultivares de arroz en las condiciones de la localidad de Los Palacios, para crear las bases del patrón general de la formación del rendimiento en el cultivo y los **objetivos específicos** consistieron en:

- Determinar la duración de las fases y etapas fenológicas, de cuatro cultivares de arroz de diferente ciclo vegetativo, y la dinámica de crecimiento de la parte aérea de las plantas.
- Relacionar las variaciones del desarrollo de los cultivares estudiados en diferentes épocas de siembra con las variaciones de la radiación solar y la temperatura ambiental.
- Determinar la contribución de diferentes órganos de la planta de arroz en la exportación de masa seca hacia los granos.
- Estimar la eficiencia del uso de la radiación y el rendimiento potencial del cultivo en las condiciones de la localidad estudiada.

Novedad científica: Se establece la relación de las variables del crecimiento con el rendimiento, asociada al efecto de las condiciones climatológicas en Cuba. Se identifican variables fisiológicas asociadas al rendimiento como posibles indicadores para la selección de cultivares de arroz de alto potencial de rendimiento. Se contribuye al conocimiento del llenado del grano, a partir de la relación fuente–sumidero, en dependencia del comportamiento de variables meteorológicas prevalecientes durante el proceso. Además, los aspectos de la Ecofisiología Vegetal, tanto metodológicos como de contenido, abordados en el trabajo, no habían sido informados integralmente en Cuba para esta especie vegetal. Se establece un esquema bioclimático de la formación del rendimiento en el cultivo del arroz para dos épocas de siembra y se generan conocimientos que directamente serán utilizados para la aplicación de tecnologías a escala local, con el fin de aumentar los rendimientos en el cultivo y contribuir al uso más eficiente de los recursos naturales.

Importancia teórica: Se exponen las bases fisiológicas de la formación del rendimiento. Se profundiza en el estudio de la distribución de masa seca en los diferentes órganos de la planta y la influencia de variables meteorológicas en el crecimiento y rendimiento del arroz, y se demuestra que la variación en el crecimiento provoca importantes efectos en el rendimiento.

Importancia práctica: Se establecen criterios fisiológicos que contribuyen al desarrollo de programas de mejoramiento genético en el cultivo del arroz, encaminados a la obtención de cultivares adaptados a las condiciones de Cuba y con alto potencial de rendimiento. Se identifican etapas críticas del desarrollo teniendo en cuenta las variaciones en el clima, que permiten perfeccionar las actividades de manejo a escala local, para lograr un mayor rendimiento optimizando los recursos. Además, se crean las bases para la calibración y validación de modelos de simulación que pueden ser usados como herramientas de trabajo en la investigación, la docencia y en la producción, y así lograr el uso óptimo de recursos y la cuantificación relativa de riesgos ante variaciones del clima.



REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Generalidades sobre el cultivo del arroz

2.1.1. Taxonomía y origen

El arroz (*Oryza sativa* L.) es una planta monocotiledónea ubicada dentro del Grupo Fanerógama, Tipo Espermatofita, Subtipo Angiosperma, Clase Monocotiledónea, Orden Glumiflora, Familia Poaceae, Subfamilia Panicoideas, Tribu *Oryzae*, Subtribu *Oryzineas* y Género *Oryza*. Es una de las plantas alimenticias más antiguas que el hombre conoce y es imposible decir con exactitud la época en la que se comenzó a cultivar. Resulta difícil determinar el lugar de origen, aunque muchos autores coinciden que se localiza en el sudeste asiático, fundamentalmente en zonas de la India y China, hace más de siete mil años (Angladete, 1969).

En la actualidad, el género *Oryza* abarca alrededor de 25 especies diseminadas en las regiones tropicales y subtropicales de Asia, África, Australia, América Central y del Sur y sólo se reconocen dos especies cultivadas: *sativa* de origen asiático y *glaberrima* de origen africano (Akinbile y Sangodoyin, 2010). En el caso específico de esta planta cultivada, los procesos naturales de evolución han causado una alta variabilidad genética, demostrada por el gran número de cultivares que hoy existen; así mismo, está considerado como el cultivo más versátil, pues los 120 000 cultivares conocidos se adaptan a diferentes climas, suelos y condiciones hídricas, por lo que se han realizado numerosos estudios del cultivo, incluyendo la secuencia del genoma (Zuo y Li, 2013), y se considera una especie modelo para estudios de monocotiledóneas (Feng *et al.*, 2002).

En tal sentido, Quintero (2009) destaca que éste presenta una gran adaptabilidad a diferentes condiciones ambientales por lo que se pueden definir cuatro agroecosistemas principales, denominados: arroz irrigado, arroz de secano, arroz de tierras bajas lluviosas y arroz de tierras inundadas. Aproximadamente el 55 % del arroz sembrado en el mundo pertenece al agroecosistema de arroz irrigado y de allí se obtiene el 75 % de la producción mundial.

El cultivo fue establecido en Cuba alrededor del año 1750 (Deus, 1995); sin embargo, no fue hasta aproximadamente el 1950, cuando fueron introducidas en el país algunos cultivares norteamericanos, como Blue Bonnet 50 y Century Padna 23. Estos por ser de porte alto, mostraron susceptibilidad al acamado y poca resistencia a enfermedades, y fueron sustituidos por cultivares de tipo índica mejorados, procedentes del Instituto Internacional de Investigaciones del Arroz (IRRI), en Filipinas, y del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), de Colombia (Morejón *et al.*, 2005).

2.1.2. Importancia del cultivo.

El arroz proporciona más calorías que cualquiera de los otros cereales cultivados (Acevedo *et al.*, 2006; Puldón *et al.*, 2011 b). Tiene un aporte básicamente calórico a la dieta y en el grano, el almidón se encuentra en mayor proporción con un 88 a 90 % de su masa seca. Además el contenido de proteínas en el mismo, no debe menospreciarse, pues resulta el segundo componente químico, cuyo valor oscila entre 7,5 y 9,0 %. Aunque en los últimos años, se ha logrado incrementar notablemente el valor nutritivo en el cereal (Won *et al.*, 2002; Puldón *et al.*, 2011 a), fundamentalmente en su contenido de proteínas y hierro.

En Cuba, el cultivo se ha extendido a casi todas las regiones del país y cobra cada día mayor importancia. En la década de los ochenta, el aporte alimentario de este cereal representó el 13 % de las proteínas y el 15 % de la energía en la dieta de los cubanos y posterior al año 2000 el 18 % y el 20 %, respectivamente (Suárez *et al.*, 2002; Cristo *et al.*, 2006).

2.1.3. Perspectivas de la producción y el comercio del arroz en el mundo.

No se espera que en el futuro próximo el área sembrada mundialmente con arroz se expanda sustancialmente debido a una relativa escasez de tierras aptas y de agua (IRRI, 2010; Akinbile y Sangodoyin, 2011). González y Linares (2008) destacan que a partir del año 2007, comenzó una crisis de alimentos, la cual se ha materializado en un aumento de los precios internacionales para todos los cereales y las oleaginosas.

Los gobiernos están analizando con preocupación esta nueva tendencia debido a que los incrementos en los precios de los alimentos agudizan los problemas de acceso y distribución a escala regional e internacional, y por tanto influyen negativamente en los índices de pobreza y desarrollo. También este autor resalta que en el 2007, la producción mundial alcanzó el nivel record de 643 millones de toneladas, resultado que permitió apenas atender el consumo sin poder reconstruir las existencias mundiales, las cuales se encuentran en los niveles más bajos de los últimos 30 años.

Estos resultados tienen su origen en factores climáticos, como sequías prolongadas o lluvias atrasadas en ciertas regiones (Kato *et al.*, 2007; Sarvestani *et al.*, 2008); estas condiciones poco favorables pueden mantenerse. Los rendimientos han

progresado poco, (1 % al año); es decir, dos veces menos que durante la década de los 90 y tres veces menos que en los años 80; mientras que el consumo mundial, por su parte, continúa aumentando a un ritmo ligeramente superior (Alfonso *et al.*, 2011; Méndez, 2011).

2.2. Formación del rendimiento y sus componentes.

2.2.1. Formación del rendimiento.

El rendimiento puede ser considerado desde el punto de vista biológico como la cantidad de masa seca producida, y agrícola, si se refiere a la cantidad de producto útil fresco o seco, obtenido por planta o por unidad de área. Los distintos componentes del rendimiento agrícola se establecen secuencialmente a lo largo del desarrollo de la planta, bien durante el período previo a la antesis (número de panículas), en la antesis (número de granos por panícula) o entre la antesis y la madurez donde se decide la masa de los granos (García del Moral *et al.*, 1995, 2003, 2005). Esta formación secuencial proporciona a los cereales la capacidad de compensar efectos adversos sobre los primeros componentes del rendimiento mediante la elevación de los siguientes, de esta manera se logra equilibrar la cosecha bajo una gran diversidad de ambientes y circunstancias. Todo esto constituye una de las razones por las que los cereales fueron elegidos como cultivo por el hombre, desde tiempos ancestrales.

El número final de panículas depende de la cantidad de tallos producidos y la proporción de estos que darán lugar a los tallos fértiles (Simons, 1982; Hucl y Baker, 1987; García del Moral *et al.*, 2003, 2005). Numerosos factores afectan a la iniciación y supervivencia de los tallos, tales como el genotipo,

la fecha de siembra, las prácticas agronómicas (especialmente la fertilización nitrogenada) y las condiciones ambientales durante el ahijamiento (Simons, 1982; Bos y Neuteboom, 1998; Duggan *et al.*, 2000; García del Moral *et al.*, 2003, 2005).

Un elevado ahijamiento provoca la competencia por los factores nutritivos y por la luz; por lo que las condiciones ambientales y la densidad de población son aspectos que determinan el porcentaje de tallos que darán lugar las panículas (Simons, 1982; Davidson y Chevalier, 1990; Evers *et al.*, 2005). Lauer (1989) sugiere que la mortalidad de los tallos no se debe a la baja intensidad de la radiación lumínica, sino por una respuesta fotomorfogénica a la calidad de la luz filtrada por la superficie foliar (es decir, una baja relación de la radiación rojo/rojo lejano), por lo que el sombreado no sería un factor primordial, sino que juega un papel adicional en la senescencia de los tallos. En general, sólo aquellos tallos primarios y secundarios formados cuando el tallo principal cuenta con entre cuatro y seis hojas, sobrevivirán, dando lugar a panículas.

El número de granos por panícula está influido por las condiciones ambientales durante la formación de la misma y en la antesis. El aporte de nitrógeno incrementa el número de granos por panícula, principalmente a través de aumentos en el número de espiguillas formadas. Incrementa también el tamaño y la actividad de la superficie fotosintética durante la formación de panículas, espiguillas y flores (Figura 1), y la capacidad de transporte de los asimilados fotosintéticos hacia las panículas y los granos en crecimiento (Sibony y Pinthus, 1988). Por otra parte, un aumento en el número final de panículas generalmente se acompaña de una disminución en el número de granos por panícula y en la masa promedio de los

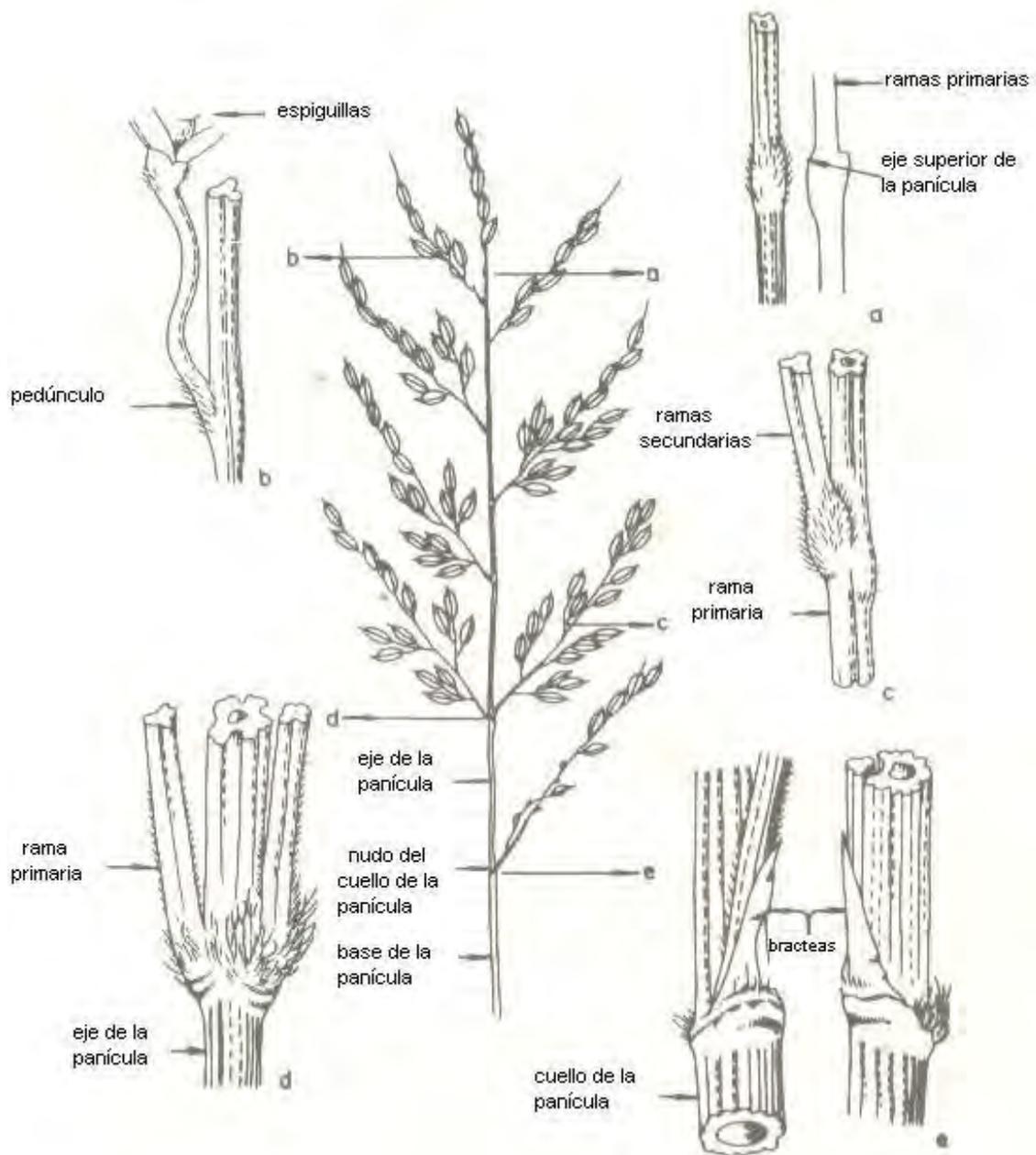


Figura 1. Flores u órgano floral de la planta de arroz (panícula). Partes de la panícula. Tomado de Fundamentals of Rice Crop Science, 1981.

granos (García del Moral *et al.*, 2003), debido a efectos de compensación durante la ontogenia de los componentes del rendimiento (García del Moral *et al.*, 2005).

El número de granos llenos por panícula se decide en la antesis, cuando parte de las flores se fecundan y dan lugar al inicio del desarrollo del grano, por lo que aumenta el proceso de traslocación desde otras partes de la planta hacia estos. En este sentido, la panícula ha de competir con hojas y tallos por el suministro de asimilados fotosintéticos (Slafer *et al.*, 1996; McMaster, 1997; Miralles *et al.*, 1998); aspecto comprobado, cuando se ha encontrado que la disminución de un cierto número de hijos, conduce a un aumento en el número de granos en la panícula del tallo principal. Esto es debido a que la reducción en la competencia por los recursos disponibles permite que se inicien más espiguillas y que las flores sobrevivan en mayor proporción. Asimismo, aquellos genotipos que poseen mayor partición de asimilados hacia la panícula en detrimento de los tallos, también suelen presentar mayor número de flores fértiles y de granos por panícula (Brooking y Kirby, 1981; Siddique *et al.*, 1989 b; Slafer y Andrade, 1991; Calderini *et al.*, 1995).

Sinclair y Jamieson (2006, 2007), han cuestionado que las variaciones en el número de granos por m² sea un factor determinante del rendimiento. Argumentan que se trata más bien de una consecuencia de la formación de éste, el cual a su vez es el resultado de la capacidad del cultivo para obtener recursos más o menos limitados del ambiente (principalmente C y N) durante la ontogenia de los componentes. Estos autores asumen que la estrategia de incrementar el tamaño del sumidero para aumentar el rendimiento puede no ser la más adecuada en el futuro. Sin embargo,

Fischer (2007) destaca que el incremento del mismo conseguido en los últimos 30 años está muy relacionado con un aumento en el número de granos.

La masa final de los granos es el resultado de los fenómenos de transporte y depósito de los asimilados desde las zonas de síntesis (principalmente la fotosíntesis de los tejidos verdes) y de almacenamiento provisional (entrenudos del tallo y pedúnculo principalmente). En los cereales, la masa final de los granos es un componente de la cosecha relativamente estable, estabilidad atribuida a la movilización de las reservas de carbohidratos almacenados en el tallo y otros órganos vegetativos. Estos pueden compensar una disminución en la capacidad de fotosíntesis durante el llenado del grano, fenómeno frecuente en zonas secas y calurosas. En un estudio realizado por Royo *et al.* (2006) se ha encontrado que la masa media por grano bajo condiciones secas y calurosas se mantiene estable, ya que no se encontraron diferencias significativas entre condiciones de secano y regadío.

Las condiciones ambientales en el período de preanthesis pueden influir en la masa final en granos; así mismo, la temperatura media del aire, entre el estadio cercano a la anthesis, también guarda relación con la misma y se precisa además, que las altas temperaturas durante esta etapa, pueden dar lugar a una reducción de la masa de los granos (Calderini *et al.*, 1999; 2001). Estos efectos deben ser causados por la reducción de la actividad de la fotosíntesis provocada por la elevación de la temperatura y el consiguiente desbalance entre fotosíntesis y respiración, que daría como resultado una menor disponibilidad de asimilados desde la fuente.

Igualmente, un elevado número de granos por panícula puede afectar negativamente la masa de los granos (Acreche y Slafer, 2006), aunque los mecanismos serían diferentes y estarían relacionados con la competencia por asimilados entre sitios de consumo.

Bajo condiciones normales de crecimiento, aproximadamente más de la mitad de los fotoasimilados que se acumulan en el grano, proceden de la fotosíntesis del limbo y de la vaina de la hoja bandera, y de la penúltima hoja (Gebbing *et al.*, 1999). No obstante, en condiciones limitantes, la contribución de las reservas acumuladas en los entrenudos del tallo en preanthesis aumenta, muy posiblemente porque la fotosíntesis después de la emergencia de la panícula se encuentra limitada (Gebbing *et al.*, 1999).

2.2.2. Rendimiento Potencial.

El rendimiento potencial se define como el que alcanza un cultivo cuando crece en un ambiente sin limitaciones de agua y nutrientes y, además, cuando las plagas se controlan efectivamente. Para un determinado cultivar, en un ambiente específico, el rendimiento potencial es determinado por la cantidad de radiación solar incidente, la temperatura y la densidad de plantas, esta última gobierna la tasa de desarrollo de las hojas (Zhang *et al.*, 2009).

El rendimiento real es el que obtienen los productores, donde la disminución en relación con el rendimiento potencial, se debe a un inadecuado abastecimiento de agua, ya sea de lluvia o de riego, deficiencias nutricionales, afectaciones por enfermedades, insectos y competencia de arvenses, entre otros (Ittersum y Rabigine, 1997). La diferencia entre el rendimiento potencial y el

rendimiento real logrado por los agricultores presenta la brecha explorable para posibles incrementos en la productividad agrícola (Figura 2).

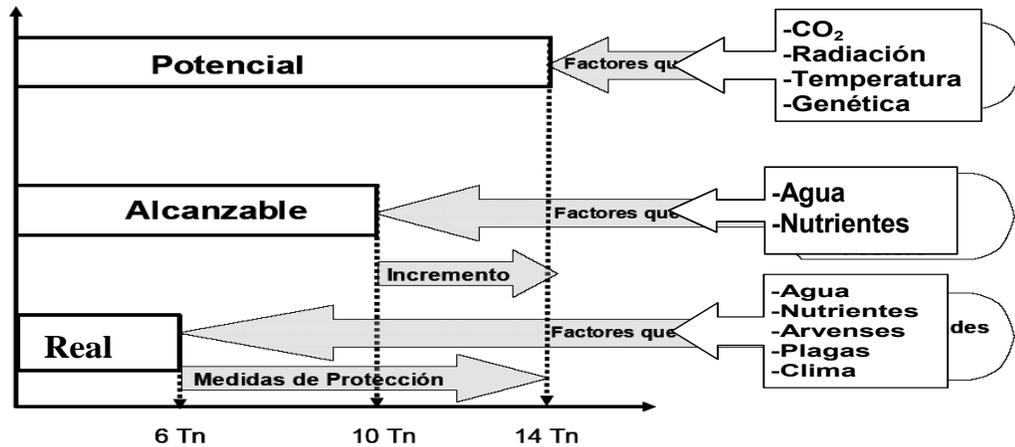


Figura 2. Marco conceptual del rendimiento potencial, el rendimiento alcanzable y el rendimiento real en condiciones de producción como resultado de los factores limitantes (Tomado de Lovenstein *et al.*, 1992).

A medida que los rendimientos obtenidos en la producción se aproximan al rendimiento potencial, se hace cada vez más difícil lograr nuevos progresos, por lo que para conseguir nuevas ganancias es necesario elevar la eficiencia en el manejo integrado del suelo, el cultivo, agua, nutrientes y plagas. En general, este ajuste riguroso no es económicamente viable a la escala de producción comercial, por lo que los rendimientos tienden a estancarse cuando el promedio de producción se acerca al 80 % del rendimiento potencial.

Partiendo de lo anterior se puede decir entonces que hay un rendimiento económicamente alcanzable que está en el orden del 80 % del rendimiento potencial. Por lo tanto para mantener esta brecha explorable del rendimiento a medida que se acerca al 80 % del potencial, hay que lograr incrementar el rendimiento potencial a

través del mejoramiento genético con la obtención de nuevos cultivares con características que permitan una mayor productividad.

El rendimiento potencial de arroz ha sido estimado en 16 t.ha⁻¹; sin embargo el rendimiento medio mundial es de unas 4 t.ha⁻¹. Este valor tan bajo, según Fageria (2007), está asociado a los factores de estrés biótico y abiótico. En Yunnan, China, Katsura *et al.* (2008) destacan un rendimiento de 16,5 t.ha⁻¹, siendo el registro más alto que se ha publicado.

En el país, los rendimientos reales medios de los cultivares de arroz que están en la producción, se encuentran alrededor de las 3 t.ha⁻¹. Sin embargo se informan para estos, rendimientos superiores, que se han alcanzado en su desempeño en una localidad particular y, aunque más elevados, posiblemente estén alejados del rendimiento potencial de los mismos.

Es por esto que se hace necesario estudiar las capacidades que el clima fundamentalmente la temperatura y radiación luminosa brindan para lograr estos rendimientos y determinar variables de la eficiencia de la planta en relación con la producción y acumulación de biomasa.

2.2.3. Estimación del rendimiento potencial.

El rendimiento potencial se desglosa en componentes ecofisiológicos más simples, como la eficiencia para interceptar la radiación y convertirla en biomasa y, la partición de materia seca entre órganos vegetativos y reproductivos (Sheehy *et al.*, 2004). En este sentido se utiliza entonces el Índice de Cosecha (IC) que indica la proporción entre el rendimiento del grano y la biomasa seca total producida (Hasanuzzaman *et al.*, 2010); y la Eficiencia de Uso de la Radiación (EUR), que no

es más que la pendiente de la relación lineal que existe entre la radiación fotosintéticamente activa que es interceptada y la producción de biomasa, cuando el cultivo crece en condiciones adecuadas.

La EUR expresa la capacidad que tiene el cultivo de convertir la radiación fotosintéticamente activa interceptada en biomasa. Sheehy *et al.* (2004) señalan que este es un parámetro que resulta importante en los modelos de cultivo para determinar el potencial productivo de un cultivar, y según lo planteado por Boschetti *et al.* (2006), entre los factores externos que reducen la EUR están la duración de las etapas fenológicas, el nivel de radiación, la temperatura y los daños por enfermedades.

Resulta interesante precisar que la temperatura representa por sí un factor que limita la EUR especialmente en especies como el arroz (planta C₃); por tal motivo se tendría que tener en cuenta la reducción fisiológica de la EUR cuando la temperatura está por encima o por debajo del rango óptimo de crecimiento (Kiniry *et al.*, 1989).

Los valores de EUR para arroz varían en torno de 2,2 a 2,56 g.Mj⁻¹ en cultivares americanos (Kiniry *et al.*, 1989; 2001), aunque Campbell *et al.* (2001) informan valores de hasta 5,66 g.Mj⁻¹. Boschetti *et al.* (2006) obtuvieron un valor de 3,14 g.Mj⁻¹ para un cultivar de tipo índica y 1,8 g.Mj⁻¹ para el de tipo japónica.

Para cultivares de arroz de alto rendimiento, Sheehy *et al.* (2004) proponen un valor medio de 2,6 g.Mj⁻¹ que podría utilizarse cuando no se dispone de información local; mientras que investigadores argentinos utilizaron una eficiencia de 2,9 g.Mj⁻¹ según lo propuesto por Boschetti *et al.* (2006), para estimar un rendimiento potencial en Entre Ríos. El resultado de tal estimación fue de 11 t.ha⁻¹; valor que ya había sido

alcanzado y superado en ensayos comparativos de rendimiento en parcelas en esa región.

Esto demuestra la variabilidad en las estimaciones de la Eficiencia del Uso de la Radiación, que vienen dadas por el tipo de cultivar de arroz de que se trate, atendiendo a su habilidad para interceptar la radiación, sintetizar fotoasimilados y acumularlos en diferentes órganos del vegetal, así como la disponibilidad de energía lumínica y las temperaturas prevalecientes durante el proceso.

Una de las variables más estudiadas en relación con la EUR es la Asimilación del Carbono a saturación lumínica (*Asat*). Sin embargo, la mayoría de los estudios muestran que al menos en cereales C_3 parece existir escasa o nula asociación entre *Asat* y el rendimiento (Slafer y Savin, 1994); razón que puede ser explicada por diversos aspectos tales como: (a) la limitación por el sumidero más que por la fuente; (b) las hojas individuales generalmente operan por debajo del punto de saturación lumínica; y (c) los diversos procesos que podrían reducir la cantidad de asimilados realmente disponibles para el crecimiento, como por ejemplo las pérdidas por respiración y fotorespiración (Silva *et al.*, 2010).

De hecho, esto se ha informado en algunos trabajos, donde se observa una asociación entre fotosíntesis, la producción de biomasa y el rendimiento, en los que se destaca que las plantas responden de manera diferente ante las distintas condiciones de crecimiento, producto de los cambios ambientales (Sato *et al.*, 2010; Lucas *et al.*, 2011). Sin embargo, estas relaciones causa-efecto deben ser consideradas con cautela, ya que aumentos de la tasa fotosintética podrían deberse secundariamente a un efecto por modificación de la fuerza de los sumideros.

En Cuba, la información relacionada con la EUR es limitada para el cultivo del arroz y, se puede considerar emplear para diferentes propósitos los valores recomendados por diferentes autores, pero resulta imprescindible avanzar en la obtención de datos que permitan un acercamiento al conocimiento de este importante parámetro, en las condiciones del país.

2.3. Aspectos del desarrollo de la planta de arroz.

El desarrollo de la planta de arroz, desde la germinación hasta la maduración, es caracterizado por una serie de períodos, cada uno identificado por un proceso de cambio en su estructura o masa de órganos específicos (Sharma y Singh, 1999). Se distinguen tres fases de desarrollo, las cuales cuentan con períodos de crecimiento definidos en cuanto a la diferenciación de la planta y los días de duración, siendo estas fases la vegetativa, la reproductiva y la de maduración. Además, existen diferentes etapas fenológicas dentro de cada una de ellas (CIAT, 2005).

Un cultivar de 120 días, cuando el crecimiento es en un ambiente tropical presenta una duración de 60 días en la fase vegetativa y 30 días en las fases, reproductiva y de maduración, respectivamente (Sharma y Singh 1999), aunque estas consideraciones deben sufrir variaciones en dependencia de los factores ambientales prevalecientes y su interacción con el vegetal.

2.3.1. Fase Vegetativa.

Se caracteriza por el crecimiento de las raíces, el incremento en el número de hijos y de hojas. Dentro de ésta existen diferentes etapas que se definen por un rápido incremento en el tamaño de la plántula, el número de hijos y la producción de materia seca. Al terminar la fase vegetativa se puede apreciar que el tamaño de la planta y el

incremento de la masa seca aumentan a menor velocidad, decrece también la generación del número de hijos y se produce la muerte de algunos. Esto puede coincidir casi simultáneamente con la iniciación de la panícula en cultivares de ciclos de corta duración y de forma sucesiva en cultivares de mayor duración de su ciclo. Lo anterior depende de cada cultivar, de las condiciones climáticas, especialmente la radiación y la temperatura (CIAT, 1985, Atencio *et al.*, 2010), así como del manejo del cultivo.

Una importante etapa de la fase vegetativa la constituye el ahijamiento, el que comienza cuando el tallo principal emite la cuarta o quinta hoja. A partir de este momento, ocurre la emergencia de los hijos primarios y secundarios; los tallos terciarios aparecen una vez que finaliza la producción de tallos secundarios. La capacidad de obtener un mayor ahijamiento en los cultivares, hace posible que las plantas puedan usar al máximo el espacio disponible, lo cual resulta más útil bajo condiciones no favorables. Este proceso es influido por la radiación solar, la temperatura y las prácticas culturales, tales como la densidad de plantación, suplemento de agua y nutrientes (Yoshida, 1981, Jaffuel y Dauzat, 2005), entre otras.

2.3.2. Fase Reproductiva.

Comienza a partir del inicio de la diferenciación de la panícula, que aún está dentro de las vainas que cubren el tallo, y finaliza cuando la planta está en plena floración (CIAT, 1985). Se caracteriza por una disminución en el crecimiento de las hojas y comienza la elongación de los entrenudos del tallo (IIArroz, 2004). Una etapa importante dentro de esta fase es la emisión de la panícula, la cual se observa por encima de la vaina de la hoja bandera y marca el comienzo de la etapa de floración

seguida por la de antesis, donde se perciben las anteras en el tercio superior de las panículas. En esta fase se define el número de granos por panícula, que resulta uno de los componentes del rendimiento que se constituye en el sumidero (sitio de consumo de carbohidratos) principal de la planta (Aguilar, 2001).

2.3.3. Fase de Maduración.

Esta abarca desde la emisión de la panícula, el crecimiento de los granos y termina con la maduración de estos. En esta etapa ocurren cambios en la masa del grano, en su tamaño y textura, así como en las sustancias de reserva y en la respiración (IIArroz, 2004).

Un aspecto importante en esta fase, es la acumulación de sustancias en el grano como resultado del transporte y la síntesis de productos de reserva, donde los granos son la fuente principal de destino. La movilización de carbohidratos previamente depositados en diferentes órganos juega un papel fundamental al inicio del llenado de los granos, y actúa como mecanismos compensatorios cuando un estrés limita la capacidad fotosintética de las láminas foliares en ese momento (Hirano *et al.*, 2005; Arguissain, 2006).

2.4. Influencia de la temperatura y la radiación solar sobre el desarrollo y la fisiología de la planta de arroz.

2.4.1. Efecto de la Temperatura.

Cada etapa, e incluso cada estado fenológico, posee un intervalo de temperatura óptima y dos temperaturas críticas. Por lo general, los valores por debajo de 20 °C y por encima de 30 °C, se consideran como críticos, y normalmente afectan el rendimiento del grano y provocan la reducción del ahijamiento (Yoshida, 1981).

Nagata *et al.* (1997) plantearon que comúnmente, el estrés por frío en el cultivo del arroz provoca afectación en la germinación, retraso en la emergencia de las plántulas, decoloración en las hojas, degeneración de la panícula, retraso en la floración, alta esterilidad en las panículas e irregularidad en la maduración, siendo las dos últimas, comunes a muchos países de clima templados. Por su parte Yoshida (1981), refirió que cuando la planta de arroz se expone a temperaturas por encima de 35 °C, los daños se producen de acuerdo a la fase de crecimiento de la planta. Así, durante la fase vegetativa puede ocurrir reducción en el ahijamiento y la altura; mientras que en la reproductiva disminuye, el número de panículas, y en la maduración, se reduce la acumulación de masa seca en los granos.

Lalitha *et al.* (1999; 2000), demostraron el efecto de las temperaturas en la producción de tallos. Estos autores encontraron que, en el rango de 24,1 a 27,4 °C de la temperatura media, aumentó el número de tallos por m² en el orden de 453 a 689. A valores de temperatura por encima de los anteriores (entre 29 y 31 °C), estos no disminuyeron pero tampoco siguieron aumentando.

Morita (2000) y Zakaría *et al.* (2002), plantearon la reducción de la translocación de los productos fotosintéticos hacia los granos cuando aumenta la temperatura, debido a un incremento de la tasa de respiración, provocando la disminución de la masa de los granos, el aumento en el número de granos estériles o parcialmente llenos y consecuentemente la cantidad y la calidad del grano. Las bajas temperaturas prolongan el período de llenado del grano, condición que resulta aceptable para obtener una mejor calidad del mismo al ser cosechado. Si las temperaturas son muy bajas ocurre la producción de granos parcialmente llenos y granos verdes.

Resulta importante el conocimiento del efecto de las temperaturas ambiente sobre el desarrollo de las plantas y en particular su relación con la acumulación de masa seca en los granos, aspectos pocos abordados en estudios en el país.

2.4.2. Efecto de la radiación luminosa.

En la acumulación de masa seca por las plantas, la radiación más importante es la parte visible del espectro, fracción de radiación solar en el rango espectral comprendido entre 400-700 nm, utilizada en la fotosíntesis. En este sentido varios autores destacan la Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR, siglas en inglés) que es aproximadamente el 45 % de la radiación solar global. La PAR es un factor medioambiental importante en el crecimiento de las plantas (Mariscal *et al.*, 2000).

La radiación luminosa, tanto en intensidad como calidad, contribuye a determinar el grado de ahijamiento y de la altura de la planta (Sparkes *et al.*, 2006). La necesidad de luz durante las primeras tres o cuatro semanas es relativamente baja. El período de máxima necesidad de luz se extiende desde la etapa de diferenciación de la panícula hasta el estado de grano pastoso. Tras el estado pastoso, habiendo alcanzado el grano su máximo contenido de masa seca, los requerimientos de luz son mínimos (Díaz *et al.*, 2013). Okawa *et al.* (2003) plantean que si la intensidad de la luz es baja, las mayores afectaciones se producen en la fase reproductiva y de maduración, lo que trae consigo la reducción del número de panículas y los granos llenos por panícula.

Yoshida (1981) destaca la obtención de altos rendimientos en la época de seca, ya que la radiación solar en los trópicos es mayor en la época seca que en la lluviosa. Esto debido a que con las lluvias, aumenta la nubosidad y se reduce la incidencia de

la radiación solar; lo que afecta la obtención de productos fotosintéticos, siendo este un factor limitante para los rendimientos en arroz (Laza *et al*, 2004). Katsura *et al*. (2008) destacan que aun cuando la radiación solar no sea muy elevada ($17 \text{ Mj.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$); con un rápido crecimiento inicial, un alto Índice de Área Foliar y buena dotación de N, se posibilita una adecuada intercepción y consecuentemente buena conversión de la radiación incidente en masa seca.

Según destacan Laza *et al*. (2004) se realizan grandes esfuerzos en el mejoramiento genético en el cultivo del arroz, para desarrollar cultivares con adaptabilidad a una baja radiación solar, al considerar la posibilidad que existe de que estos puedan cultivarse en la época lluviosa, ya que existe mayor disponibilidad de agua. En ese sentido, estos autores han sugerido manipular los sitios de consumo a partir de aumentar el tamaño de la panícula a través del incremento en el número de los granos.

Sin embargo, atendiendo al efecto de las temperaturas y la intensidad de la radiación, por fase fenológica y por proceso fisiológico, se puede señalar que esto resulta complejo. En las condiciones de Cuba, las etapas de siembra establecidas, imponen una variación regular de manera general de estos dos factores del clima. Esto provoca un efecto diferenciado por fases fenológicas, ya que son relativamente diferentes las condiciones al inicio del desarrollo de las plantas en comparación con las que se presentan al final del mismo. Por tanto, existen respuestas diferentes, que se reflejan, en última instancia, en el rendimiento. Estos aspectos son poco analizados, de manera causal, en investigaciones en el país.

En este sentido, en investigaciones realizadas en trigo se ha demostrado que el número de granos por m^2 depende principalmente de la radiación interceptada que controla la tasa de crecimiento de las espigas, y de la temperatura que controla el período de crecimiento de las espigas. Teniendo en cuenta lo anterior es que se estima el número de granos por m^2 por medio del coeficiente fototérmico (Q) que se define como el cociente entre la radiación fotosintéticamente activa media interceptada por el cultivo y la temperatura media menos la temperatura base de desarrollo para el período comprendido entre los 20 días previos y los 10 posteriores a la antesis (Abbate *et al.*, 1995; Lázaro *et al.*, 2010).

2.5. Análisis del crecimiento de las plantas.

Los estudios detallados del crecimiento de las plantas permiten cuantificar diferentes aspectos del mismo: la duración del ciclo, la definición de las etapas de desarrollo y, la distribución de los fotoasimilados por órganos. Estos son básicos para comprender mejor la productividad del vegetal como un todo, y así fundamentar más racionalmente las prácticas de manejo del cultivo: nutrición, riego, protección fitosanitaria, entre otras.

En trigo (Bauer *et al.*, 1987a), cebada (Baker y Gebeyehou, 1982) y triticale (Ford *et al.*, 1984) se ha encontrado una curva patrón de tipo sigmoideal en la evolución de la masa seca total de las plantas de estos cereales, con un máximo situado durante el período de maduración, Gent y Kiyomoto, (1989), en trigo, identificaron este punto quince días después de la antesis. Además, a través del estudio del crecimiento, se han detectado diferencias genotípicas en cebada, trigo y triticale en cuanto a la producción de biomasa (Baker y Gebeyehou, 1982;

Ford *et al.*, 1984; Austin *et al.*, 1989).

Santos *et al.* (2010) destacan que el proceso de producción de biomasa en una planta es bastante complejo ya que es el resultado del balance del metabolismo del carbono, donde resulta importante la eficiencia del follaje a partir de la intercepción y la utilización de la radiación solar disponible. Por lo que para el caso del cultivo del arroz caracteres tales como hojas grandes, rápida expansión foliar y ahijamiento temprano, pueden ayudar a favorecer este proceso de crecimiento.

En algunos estudios se ha demostrado la relación entre la biomasa total y producción de grano. En general y en ausencia de limitaciones para el cultivo, a mayor biomasa mayor rendimiento (Baker y Gebeyehou, 1982; Ramos *et al.*, 1985; García del Moral *et al.*, 1987). En trigo, Gent y Kiyomoto (1989) relacionaron las diferencias en la producción de grano con la distribución de fotosintatos y la retención de los mismos en la etapa de madurez. Bauer *et al.* (1987a) analizaron la proporción de hojas, tallos y panículas en distintos estadíos de desarrollo, la pérdida de masa de éstos durante el período de maduración resultó ser un indicativo de la movilización de reservas hacia el grano (Cutforth *et al.*, 1988). Bauer *et al.* (1987b, 1987c), en trigo, estimaron que el 71% del nitrógeno y el 57 % del fósforo del grano provenían de la traslocación desde hojas y tallo.

2.5.1. Variables primarias del análisis del crecimiento.

El análisis del crecimiento vegetal, desarrollado tanto para plantas aisladas como para una comunidad de plantas, está basado en considerar la biomasa durante el período de desarrollo como dependiente de la capacidad de intercepción de la luz por el sistema de asimilación del carbono de la planta (Gallagher, 1979;

García del Moral *et al.*, 1987). Este análisis, reconoce a la biomasa total de la planta como una medida del balance que se establece entre los procesos de fotosíntesis y respiración y, a la superficie foliar por planta o por unidad de área ocupada por estas, como la capacidad que tiene la misma de sintetizar esa biomasa.

2.5.1.1. Acumulación de biomasa.

La producción de masa seca global es la cantidad de producto seco obtenido por la planta o por unidad de área. En ella está comprendida la masa seca aprovechable o útil (producto agrícola seco) y la masa seca no aprovechable (sin utilidad agrícola).

La masa seca es el criterio más apropiado para medir el crecimiento y la magnitud de la capacidad del sistema de asimilación de la planta y el rendimiento del grano de arroz depende ampliamente de la producción total de masa seca y su distribución hacia los mismos. En un análisis del crecimiento de las plantas menos ortodoxo, se ha utilizado la biomasa acumulada por un órgano particular de la planta, en determinados momentos, buscando que esta sea más representativa del rendimiento agrícola, fundamental desde el punto de vista económico.

Jarma *et al.* (2006) señala que en plantas de arroz, la magnitud total de biomasa, se logra en dos fases diferentes de la vida de la planta: la prefloración y la posfloración. La cantidad que se acumulada proporcionalmente en estas dos fases, varía con la duración tanto del ciclo de vida de cada cultivar como de las condiciones ambientales en que éste se desarrolla.

Antes de la floración, las sustancias producidas en las hojas que sean fotosintéticamente activas (los carbohidratos) se almacenan en éstas o se traslocan a otros órganos (por ejemplo, las raíces o los tallos) y, según la función que

desempeñen en ciertas etapas del ciclo de vida; pueden actuar como órgano importador o exportador de carbohidratos. Para la planta de arroz, en todo este período resulta de suma importancia que la misma reciba una adecuada radiación solar para que su tasa de fotosíntesis sea óptima y concuerde con el desarrollo del follaje; por lo que la radiación es un factor que desempeña un papel decisivo en el desarrollo de una población de este cultivo en el campo, atendiendo a un adecuado régimen de temperatura.

Después de la floración; es el momento donde aparecen las etapas en las que se produce el 90 % de la masa seca total acumulada en los granos, ya que el 10 % restante, según Yoshida (1981), proviene de los tallos y de las hojas, donde se acumuló en etapas anteriores a la floración (Yoshida, 1981).

Este esquema general de acumulación y movilización de reservas puede no cumplirse, sobre todo en magnitud, atendiendo a las condiciones meteorológicas prevalecientes en cada etapa. Estas pueden limitar la asimilación de carbono en la fuente (hojas), en la prefloración, lo que implica una mayor movilización de reservas (anteriormente depositadas en otros órganos de la planta) de otras fuentes, para responder los requerimientos del sumidero (granos en crecimiento).

2.5.1.2. Superficie foliar.

Las hojas constituyen el órgano primordial de intercepción de la radiación y son un elemento esencial en la actividad fotosintética de la planta y la superficie foliar es la medida usual de tejido fotosintetizador de una comunidad de plantas. Además, su tamaño determina la cantidad o importe de energía solar que es absorbida y convertida en materiales orgánicos (Jerez y Martín, 2012). Se ha demostrado, que la

superficie foliar es un indicador que tiene una relación directa con el rendimiento de las plantas. La reducción en la misma trae consigo una menor captación de la radiación solar que provoca disminución de la fotosíntesis y producción de masa seca, lo que afecta el rendimiento de las plantas (García *et al.*, 2010).

En los cereales, la masa seca de las hojas y su área foliar siguen una evolución aproximadamente similar durante el ciclo, con máximos que se producen con anterioridad a la antesis, generalmente situados alrededor de la etapa de embuchamiento (Bauer *et al.*, 1987 a). Específicamente en el arroz, la superficie foliar máxima se alcanza antes del espigado, en el momento en el que la hoja bandera ha emergido completamente (López, 1991).

Para lograr una máxima productividad biológica, el vegetal debe alcanzar una magnitud de la superficie foliar elevada en momentos tempranos del desarrollo y que ésta permanezca activa durante la mayor parte de la vida de la planta.

2.5.1.3. Índice del Área Foliar (IAF).

A partir de la superficie foliar puede ser calculado el Índice de Área Foliar (IAF), que no es más que la superficie foliar de la planta por unidad de área de suelo que ésta ocupa, y suministra información importante de la capacidad productiva real de una comunidad de plantas (Kvet, 1971). Se ha demostrado que este índice utilizado en estudios fisiológicos del proceso de crecimiento, constituye un aspecto importante en los programas de mejoramiento genético en los cultivos (López, 1991). En ese sentido, se le concede importancia especial a su dinámica, al constituir un indicador de la cobertura de la planta en el área cultivada (Torres y Álvarez, 1991; Aguilar *et al.*, 2011; Aguirre, 2011) y la capacidad primaria de la planta de captar la

energía luminosa y convertirla en carbohidratos (Peil y Gálvez, 2005; Koyama y Kikuzawa, 2009).

Por consiguiente, optimizar el Índice de Área Foliar (IAF), es de vital importancia para maximizar el rendimiento. Existe normalmente una relación positiva entre el IAF y el rendimiento en los cereales (López, 1991); este autor destaca que en investigaciones realizadas se demuestra que el rendimiento se incrementa con el aumento del IAF hasta un cierto límite, para un cultivar dado en condiciones ecológicas y técnicas del cultivo determinadas. Los valores de IAF superiores a ese límite tienen como resultado una disminución del rendimiento económico del cultivo.

El tamaño y la dinámica del IAF dependen de numerosos factores agronómicos y climáticos, también de factores biológicos, tales como diferencias entre cultivares, tipo de ahijamiento y altura de la planta, y agronómicos, entre los que se destaca la densidad de plantas, la dosis de fertilizante nitrogenado, el cual prolonga la actividad fotosintética de las hojas (López, 1991). El valor de IAF próximo a 4, permite interceptar más del 95 % de la radiación incidente, una magnitud del IAF en exceso incrementa los riesgos de encamado y de tipo parasitario a causa del micro clima que se crea en el interior del cultivo y se consideran IAF óptimos los valores comprendidos entre 4 a 7 en diferentes cultivares de este cereal (López, 1991).

En trigo y en cebada, numerosos estudios han señalado la existencia de una fuerte relación entre el Índice de Área Foliar (IAF) y la producción de biomasa (Borojevic *et al.*, 1980; García del Moral *et al.*, 1985; Ramos *et al.*, 1985, Bauer *et al.*, 1987 a; Karimi y Siddique, 1991); sin embargo, la literatura es bastante contradictoria acerca de los valores de IAF cuando se alcanza la máxima tasa de crecimiento del cultivo,

aunque en general, se considera que en cereales el IAF ideal se sitúa alrededor de 4. En situaciones de cultivo muy intensivas, se han encontrado producciones de grano máximas con IAF comprendidos entre 9 y 10 (Borojevic *et al.*, 1980).

2.5.1.4. Duración del Área Foliar (DAF).

No sólo resulta importante lograr una magnitud máxima del IAF elevada (superior a 4), sino que esta debe permanecer en el tiempo. De esta manera, Watson en 1947 integró el IAF en el tiempo y llamó a esto Duración del Área Foliar (DAF), la cual toma en cuenta tanto la duración como la cantidad de tejido fotosintético del cultivo. Usualmente la DAF está muy relacionada con el rendimiento, debido a que la intercepción de la radiación solar durante un largo período generalmente significa mayor producción de masa seca. Las diferencias en la biomasa total producida son, frecuentemente, el resultado de la duración de la fotosíntesis como de la tasa fotosintética.

Slafer y Savin (1994) destacan que la DAF es fácilmente medible y dado que está relacionada con la producción de masa seca, puede dar una idea de la productividad del cultivo; señala que la misma representa una buena estimación del rendimiento del grano en trigo, si se determina desde la emergencia de la panícula hasta madurez, aunque la producción fotosintética de la panícula hace una buena contribución al rendimiento en grano. Además, precisan estos autores, que la mayoría de los carbohidratos almacenados en el grano de trigo, provienen de la fotosíntesis producida luego de la emergencia de la panícula, la DAF a partir de ese momento puede ser correlacionada con el rendimiento.

Estudios citados por Evans y Neild (1981), muestran que la DAF puede explicar cerca de la mitad de la variación de los rendimientos en grano de los cereales, aún en condiciones climáticas, prácticas agronómicas y cultivares muy diferentes. Sin embargo se destaca que aunque este índice de crecimiento es una medida eficiente para predecir el rendimiento, el mismo sólo es una estimación de la utilización de la luz en el tiempo. Mediciones reales de radiación y de intercepción de ésta por la planta, integradas en el tiempo, se relacionan mejor con el rendimiento que la DAF.

Varios autores destacan la importancia de que en los cultivos de cereales se pueda lograr una alta DAF después de antesis, ya que, si el tejido fotosintético permanece más tiempo activo, la disposición de asimilados para el grano será mayor. De hecho, en un gran número de casos, las diferencias en el rendimiento de grano se pueden explicar por las variaciones en DAF desde la antesis a madurez, existiendo buenas correlaciones entre este índice y la producción final de grano en varios cereales (Borojevic y Williams 1982; García del Moral *et al.*, 1987; Siddique *et al.*, 1989).

2.5.2. Índices del análisis del crecimiento.

Varios índices se construyen a partir de las variables primarias del análisis del crecimiento y contribuyen a facilitar la interpretación del desarrollo del vegetal y su relación con la productividad biológica y agrícola del mismo.

2.3.2.1. Tasa Absoluta de Crecimiento (TAC).

La TAC es el incremento de material vegetal por unidad de tiempo, que no es más que la pendiente de la curva sigmoide, en cada instante de desarrollo. Sus unidades son las de masa por unidad de tiempo ($\text{g}\cdot\text{día}^{-1}$) y expresa la intensidad con la que el vegetal está acumulando masa seca. Cuando se trate de otra variable, como la

superficie foliar o la altura, cobra el mismo significado para el crecimiento de la variable en cuestión y las unidades para su expresión están en concordancia con ésta.

Su dinámica permite seguir el curso del desarrollo del vegetal y contribuye a comprender los momentos de cambio en la fisiología de la acumulación de masa seca o de la variable fisiológica que se esté considerando.

A pesar de su utilidad, las determinaciones puntuales de la TAC no expresan la intensidad del cambio en su forma más lógica, ya que plantas con tasas similares pueden encontrarse en estados fisiológicos diferentes y su interpretación puede ser riesgosa (Torres, 1989).

No obstante lo anterior, la determinación de la TAC ha sido empleada ampliamente en diferentes autores, entre las que se pueden mencionar a Soroa *et al.* (2007); Hossain *et al.* (2011); Hernández y Soto (2012 a) y Soto y Hernández (2012).

2.5.2.2. Tasa de Asimilación Neta (TAN).

El incremento del material vegetal por unidad de sistema asimilativo por unidad de tiempo se denomina Tasa de Asimilación Neta (TAN) y se expresa en $\text{g.cm}^{-2}.\text{día}^{-1}$. Este índice es obviamente una medida del balance que existe entre la actividad fotosintética y la respiratoria de la planta (Jarma *et al.*, 2006).

Los anteriores autores destacan que la TAN se encuentra positivamente relacionada con la intensidad luminosa, dentro de los límites naturales y esto resulta lógico, si se tiene en cuenta que la velocidad de la fotosíntesis está directamente ligada a la radiación dentro de ciertos límites y que a un aumento de esta, dado el incremento

de la intensidad de la radiación se debe esperar una mayor disponibilidad de fotosintatos para el crecimiento.

Con respecto a la temperatura, se plantea que existe una disminución en la TAN a valores elevados (superiores a los 31 °C). Al respecto se debe tener en cuenta que un aumento de la temperatura provoca aumentos tanto en la fotosíntesis como en la respiración, pero después de cierto valor, la respiración puede continuar aumentando, mientras que la fotosíntesis disminuye, por lo que puede no presentarse una ganancia neta e inclusive pérdidas en la masa seca.

La disminución de la TAN después de alcanzar el máximo valor, indica que la capacidad fotosintética de la superficie foliar tiende a disminuir continuamente con el crecimiento y expansión de la misma y puede cesar en el momento en el que las plantas alcanzan su máximo valor, debido principalmente, al sombreado que ocurre entre las hojas de los diferentes estratos, lo cual ocasiona que la respiración tienda a ser más intensa que la fotosíntesis (Torres, 1989).

La TAN no debe asumirse como un indicador de la asimilación del carbono (fotosíntesis), pues tiene en cuenta la pérdida de sustancias carbonadas debido a la respiración y la fotorespiración; más aún si se trata de hacer un análisis más cercano a la productividad agrícola de un cultivo. Si se analiza la acumulación de masa del órgano cosechable, puede ser importante el aporte que las sustancias almacenadas previamente en otros órganos y movilizadas al de importancia económica durante su crecimiento; por tanto la interpretación del comportamiento de la TAN estaría alejada del balance entre producción y consumo de sustancias en ese período. En varias investigaciones se ha empleado el cálculo de la TAN en el cultivo del arroz y otros

cereales, donde de manera general se observa un aumento de la misma en etapas iniciales de crecimiento para después de caer en las etapas finales (Hossain *et al.*, 2011; Jahan y Golam, 2011; Hernández y Soto, 2012 b).

2.5.3. Métodos para desarrollar el análisis del crecimiento.

Para desarrollar el análisis del crecimiento en la actualidad, se reconocen dos métodos, denominándose Clásico, al que utiliza los valores medios de las variables entre dos muestreos sucesivos del desarrollo de las plantas, y Funcional o de regresión, al que emplea las funciones matemáticas para el ajuste de los datos primarios y deriva los índices del análisis del crecimiento a partir de estas funciones (Torres, 1989).

En el método clásico, se hace difícil la interpretación de los resultados y la comparación entre tratamientos. Esto es debido a que el muestreo de plantas diferentes, en distintos intervalos de tiempo, hace que se obtengan líneas quebradas asociado fundamentalmente a errores en el muestreo y a la variabilidad existente entre las plantas. Más aún, cuando son pocos los momentos del desarrollo evaluados, el análisis se torna más difícil por no disponer de suficiente información del comportamiento de las plantas ante determinados tratamientos.

El método funcional simplemente describe las variables primarias atendiendo al tiempo de desarrollo del vegetal, por medio de funciones matemáticas adecuadas a través del análisis de regresión. A partir de estas funciones, se derivan los Índices del crecimiento. Se han señalado varias ventajas con el empleo de este acercamiento, entre las que se encuentran el que todos los muestreos desarrollados participan en la descripción de los datos y que permite la fácil comparación entre tratamientos de un

mismo experimento y hasta de experimentos diferentes.

No obstante, el éxito en la aplicación de este método, estriba en encontrar una función matemática adecuada para la descripción de las variables primarias, tanto desde el punto de vista matemático como biológico. Para el ajuste de las variables del crecimiento se han utilizado diferentes funciones y son las polinómicas las que más se han empleado para caracterizar las curvas de crecimiento de cereales.

2.6. Relación fuente-sumidero.

La dirección de la translocación de sustancias por el floema está definida por la posición del órgano que exporta los productos fotosintéticos, conocido como fuente, y del que importa los mismos, conocido como sitio de consumo o sumidero. En la planta se producen un conjunto de interacciones entre los órganos fuente y sumidero, que conllevan a patrones de distribución de los fotoasimilados particulares (Cruz, 2000).

2.6.1. Distribución y movilización de los fotoasimilados en las plantas.

Las relaciones fuente-sumidero en la mayoría de los cultivos, sobre todo en arroz, pueden ser simples y directas en las plántulas jóvenes, donde los cotiledones que contienen las sustancias de reserva representan la fuente y las raíces y hojas en crecimiento el sumidero principal. En las plantas adultas, la mayoría de las hojas maduras superiores exportan los productos asimilables hacia el ápice del vástago, las hojas inferiores exportan hacia las raíces y las hojas intermedias en ambas direcciones, este patrón sufre modificaciones con el desarrollo de las plantas y/o por el efecto de factores externos, en lo fundamental los ambientales.

En tal sentido Peng *et al.* (1999) plantean que la acumulación y movilización de masa seca se ha asociado con las diferencias en la etapa de llenado de los granos de arroz. Por tanto, el suministro de asimilados hacia el grano durante su formación, proviene tanto de la fotosíntesis como de la translocación de reservas acumuladas en la pre-antesis. La importancia relativa de cada una de estas vías dependen también de las condiciones ambientales durante el llenado, ya que mientras que en climas frescos y lluviosos es la fotosíntesis la que más contribuye en el llenado (Austin *et al.*, 1977), la translocación de asimilados almacenados en diferentes órganos de la plantas resulta especialmente importante en climas secos y calurosos (Acevedo *et al.*, 1991; Pheloung y Siddique, 1991).

En esta forma, Austin *et al.* (1977) destacaron en trigo la pérdida de masa específica del tallo desde la antesis hasta la madurez, y la atribuyen a la movilización de carbohidratos. El papel del último entrenudo del tallo en la movilización de reservas, especialmente de azúcares solubles, se ha señalado como más importante que el de las propias hojas (McCraig y Clarke, 1982). Mientras que el contenido en carbohidratos de los limbos se mantiene prácticamente constante durante el llenado del grano, en los tallos se produce una disminución progresiva con el tiempo.

Además, los tallos son capaces de almacenar temporalmente asimilados procedentes de la fotosíntesis después de la antesis, actuando como órgano regulador entre la máxima producción de asimilados y el máximo requerimiento de los mismos. La hoja bandera juega un doble papel en el suministro de asimilados ya que mantiene la actividad fotosintética una vez que ha comenzado la senescencia y

la vaina actúa como almacén de nutrientes (Araus y Tapia, 1987; Seneweera *et al.*, 2002; Mohapatra *et al.*, 2004).

El rendimiento del arroz está controlado por el tamaño de la fuente, lo cual ha sido objeto de estudio en diferentes investigaciones y fundamentalmente en el llenado de los granos, el tamaño de la fuente, es proporcional a la cantidad de carbohidratos no estructurales (CNE) almacenados hasta la etapa de floración. El tamaño del sumidero, está determinado por el número de granos por unidad de área y por la masa de los granos completamente maduros (Peng *et al.*, 1999; Lubis *et al.*, 2003).

Las diferencias del rendimiento en grano, pueden ser explicadas a través de la capacidad de asimilación de la planta, del almacenamiento de los productos fotosintéticos en la panícula y del sistema de transporte para movilizar los fotoasimilados desde la fuente hasta el sumidero (Valadez *et al.*, 2006). Por tal motivo, diversos autores han realizado varios ensayos para esclarecer los caracteres de la planta con mayor contribución al rendimiento. Así, Lubis *et al.* (2003) atribuyeron los rendimientos altos en un cultivar de arroz, a un número mayor de granos y a una mayor masa seca de la parte aérea. Es de destacar que, el mayor rendimiento se obtuvo cuando fue mayor la correlación de éste con el tamaño del sumidero; aunque cuando se tuvo en cuenta la fuente, el rendimiento se correlacionó principalmente con la producción de materia seca de la parte aérea de la planta.

El llenado de los granos es un proceso que determina el rendimiento y constituye la fase final del desarrollo de los cereales, donde los ovarios fertilizados se desarrollan en cariósides (Takai *et al.*, 2005). Su duración y la tasa de crecimiento determinan la masa final del grano, un componente esencial con una fuerte contribución al

rendimiento total de las plantas. En los sistemas actuales de producción un aspecto de vital importancia ha sido el perfeccionamiento del llenado de los granos (Saini y Wesgate, 2000; Zahedi y Jenner, 2003).

Por tal motivo, el metabolismo de los carbohidratos de reserva ha sido examinado en diferentes órganos de la planta como en las vainas foliares, hoja bandera (HB), tallos y en distintos estados de maduración. Esto ha permitido enfatizar sobre la distribución y la participación de los carbohidratos acumulados en estos órganos en el proceso de llenado de los granos (Fujii y Saka, 2001; Lin *et al.*, 2001; Yang *et al.*, 2001b; Nagata *et al.*, 2001; He *et al.*, 2005).

Según Mae (1997), el suministro de los productos fotosintéticos procedente de las hojas ha contribuido entre un 60-90 % del carbono necesario para desarrollar los granos. El almidón almacenado en los tallos y en las vainas foliares antes de la floración, también contribuyen en un 30-40 % al rendimiento en grano (Yang y Zhang, 2006, 2010).

Watanabe *et al.* (1997), observaron en plantas de arroz un incremento en el contenido de almidón en el tallo y en las vainas foliares, antes del proceso de la antesis. Los valores máximos se alcanzaron alrededor de la fecha de la floración (Hirose *et al.*, 1999; Yang *et al.*, 2001 a y b; 2002; 2003; Nagata *et al.*, 2001; Okawa *et al.*, 2003; He *et al.*, 2005). Por consiguiente, He *et al.* (2005) confirmaron que el tallo y las vainas foliares fueron órganos sumideros de almacenamiento temporal de fotoasimilados antes de la floración.

He *et al.* (2005) han identificado variaciones en la concentración de carbohidratos en diferentes segmentos de la vaina en la tercera hoja de la planta de arroz. En este

caso, el contenido de almidón fue bajo en el segmento apical, con valores que oscilaron entre 1 y 8 mg, y éste se incrementó hacia el segmento basal, con valores máximos de 40 y 70 mg según el cultivar estudiado.

Son pocos los trabajos desarrollados en el país relacionados con estas complejas relaciones fuente-sumidero, que requieren para su profundización del empleo de carbono marcado radioactivamente en la asimilación y la determinación de su depósito en diferentes órganos y posterior movilización. No obstante lo anterior, un acercamiento adecuado se relaciona con la determinación de la masa seca de los posibles órganos involucrados en el mecanismo, en diferentes momentos del desarrollo de las plantas, en particular en la etapa de crecimiento del órgano de importancia desde el punto de vista económico, y tener en cuenta en este análisis el comportamiento de las variables del clima que puedan estar influyendo en el proceso.



MATERIALES Y MÉTODOS

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Condiciones experimentales generales.

Los experimentos se desarrollaron en la Unidad Científico Tecnológica de Base Los Palacios (UCTB-LP), perteneciente al Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas; situada en la llanura sur de la Provincia de Pinar del Río, a los 22°44' de latitud Norte y a los 83°45' de latitud Oeste, a 60 m.s.n.m, con pendiente aproximada de 1%, según Atlas de Cuba (ICGC, 1978); en el período comprendido entre los años 2004-2009. Se utilizaron cuatro cultivares de arroz de diferentes ciclos vegetativos, los cuales se sembraron en diferentes fechas, de las dos épocas de siembra establecidas en Cuba para el cultivo: "poco lluviosa", de noviembre a febrero y "lluviosa", de marzo a agosto (MINAG, 2008), (Tabla 1).

Tabla 1. Fechas de siembra utilizadas en los experimentos para las dos épocas de siembra: "poco lluviosa" y "lluviosa".

No.	Época "poco lluviosa" (noviembre-febrero)			No.	Época "lluviosa" (marzo-agosto)		
	Día	Mes	Año		Día	Mes	Año
1	15	enero	2004	5	1	marzo	2006
2	2	diciembre	2004	6	27	agosto	2006
3	10	febrero	2005	7	13	abril	2007
4	10	enero	2006	8	14	abril	2008
				9	10	abril	2009

El suelo del área donde se desarrollaron los experimentos se clasifica, según la Nueva Versión de Clasificación Genética de los Suelos de Cuba (Hernández *et al.*, 1999), como Hidromórfico Gley Nodular Ferruginoso Petroférrico y algunas propiedades que caracterizan su fertilidad se presentan en la tabla 2.

Las labores fitotécnicas se realizaron según lo recomendado en el Instructivo Técnico del Cultivo de Arroz (MINAG, 2001). Se aseguró la disponibilidad de agua durante

todo el ciclo del cultivo, se realizó el control de plagas y arvenses de manera efectiva y la fertilización se efectuó mediante la aplicación de K₂O y P₂O₅ de fondo, a razón de 75 y 65 kg.ha⁻¹ respectivamente, y 150 kg.ha⁻¹ de nitrógeno, fraccionados durante el ciclo del cultivo (cuarta hoja, inicio de ahijamiento, ahijamiento activo y punto de algodón, donde se aplicaron el 20, 25, 25 y 30 % del total, respectivamente). Se utilizaron como portadores el superfosfato triple (46 % de P₂O₅), el cloruro de potasio (60 % de K₂O) y la urea (46 % de N) (MINAG, 2001).

Tabla 2. Algunas propiedades de la capa arable (0-20 cm) que caracterizan la fertilidad del suelo donde se desarrollaron los experimentos.

Terrazas	pH KCl	Ca ⁺⁺	Mg ⁺	Na ⁺⁺	K ⁺	P ₂ O ₅	MO
		cmol. kg ⁻¹ Suelo				mg. 100 g ⁻¹ de suelo	%
1	5,16	6,68	3,04	0,19	0,12	27,94	2,34
2	5,13	6,67	2,50	0,09	0,28	12,57	2,92
3	5,55	7,05	3,48	0,28	0,28	16,00	2,98
4	5,39	6,88	3,12	0,09	0,28	7,74	2,69
5	6,28	7,76	3,50	0,14	0,18	38,10	2,68
Promedio	6,49	7,01	3,13	0,16	0,23	20,47	2,72
CV (%)	7,19	6,4	13,0	50,5	32,5	60,4	9,27

Las principales características de los cultivares en estudio se presentan en la tabla 3, los que se sembraron por siembra directa (a voleo), con una norma de 120 kg.ha⁻¹ de semillas para asegurar al menos 200 plantas por m². Se empleó un diseño experimental de bloques al azar con cuatro réplicas y parcelas experimentales de 64 m² de superficie.

Los valores de las variables meteorológicas (temperaturas máximas, mínimas y medias, precipitaciones y radiación global, diarias) de los años en que se desarrollaron los experimentos, se obtuvieron de la Estación Meteorológica de Paso Real de San Diego, en Los Palacios, a unos 3 km aproximadamente del área

experimental. En los Anexos 1 y 2, aparecen graficadas las medias decenales para cada variable.

Tabla 3. Principales características biológicas de los cultivares de arroz (*Oryza sativa* L.) estudiados en los experimentos.

Características	Cultivares			
	INCA LP-5*	Reforma*	INCA LP-2**	Jucarito 104*
Progenitores	2077/ CP1C8	Taichun Senyu 204/ ChianungSenyu 14	IR 759-54- 2 2/6066	IR 480-5-2/ IR30-16-1
Duración del ciclo (días)				
Época “poco lluviosa”	128	122	134	147
Época “lluviosa”	110	105	114	119
Clasificación según el ciclo	Corto	Corto	Medio	Medio
Altura de la planta (cm)	90	90-110	88	85
Longitud de la panícula (cm)	23	26	24	23
Número de granos por panícula	90	150	90	112
Masa de mil granos (g)	29,5	26,6	29	28
Rendimiento (t.ha ⁻¹)				
Época “poco lluviosa”	8,2	7,5	7,8	8,6
Época “lluviosa”	5,7	5,7	6,7	5,9

*Información tomada de MINAG (2005) y ** de Pérez, 1998.

3.1. Evaluación del rendimiento agrícola y sus componentes.

La determinación del rendimiento agrícola y sus principales componentes se realizó en cada parcela experimental según lo recomendado por (Amador y Peña, 1986). Para el rendimiento agrícola, se tomó un área de 1 m², con dos repeticiones en cada réplica y los valores se expresaron en t.ha⁻¹, al 14 % de humedad del grano. Para las panículas por m², se empleó el método de conteo en un área de 0,50 m², con cuatro repeticiones por parcela. Para el número de granos por panícula, se tomaron al azar 20 panículas, éstas se desgranaron, se separaron los granos vanos de los llenos y se contaron. Para la masa de 1000 granos, se tomaron dos muestras por parcela de 1000 granos llenos, los que se pesaron en una balanza analítica.

3.2. Desarrollo fenológico, respuesta a la temperatura y determinación de grados días de calor acumulados para el desarrollo de las fases.

3.2.1. Duración de las fases fenológicas de los cultivares estudiados.

Se evaluó en cada parcela experimental, la duración en días de las tres fases fenológicas del cultivo; para lo cual fueron considerados para la fase vegetativa, los días transcurridos desde la emergencia hasta el punto de algodón; para la fase reproductiva, desde el punto de algodón hasta que finalizó la etapa de antesis; y para la de maduración, desde la antesis hasta la madurez del grano. Se identificó cada fase cuando más del 50 % de la parcela experimental mostró las características de estas etapas, según lo descrito en la tabla 4. También se determinó la duración en días de diferentes etapas dentro de cada fase y se estableció el ciclo del cultivo mediante la sumatoria de la duración de cada una de ellas (CIAT, 1985).

3.2.2. Influencia de la temperatura en la duración de las fases fenológicas.

Los datos del comportamiento de la temperatura máxima y mínima diarias durante el ciclo de los cultivares estudiados, para cada fecha de siembra, se graficaron para su análisis, de conjunto con la duración de las fases fenológicas de cada cultivar.

3.2.3. Grados días de calor acumulados para el desarrollo de cada fase y etapa.

A partir de la duración de las etapas y fases fenológicas que alcanzaron los cultivares en las diferentes fechas de siembra (epígrafe 3.2.1) y teniendo en cuenta los registros de temperaturas, se calcularon los grados días de calor acumulados (GDCA) para cada una de éstas mediante la sumatoria de los grados días de calor (GDC) que fueron determinados a partir de la ecuación (1) (Rodríguez y Flores, 2006).

$$GDC = \frac{T_{m\acute{a}xima} + T_{m\acute{i}nima}}{2} - T_{base} \quad (1)$$

Tabla 4. Descripción de cada una de las etapas de las diferentes fases del desarrollo en el cultivo del arroz (*Oryza sativa* L.). Tomado de CIAT (1985).

Fases	Etapas	Descripción de las etapas
Vegetativa	Plántula	Desde que emerge la primera hoja hasta la cuarta hoja.
	Inicio de ahijamiento	Aparición de los hijos primarios que emergen secuencialmente del primero, segundo y tercer entrenudo del tallo principal.
	Ahijamiento activo	Aparición de los hijos secundarios y terciarios que emergen secuencialmente del primero, segundo y tercer entrenudo de los tallos primarios.
	Máximo ahijamiento	Se alcanza el número máximo de hijos.
Reproductiva	Punto de algodón	Cuando el primordio o embrión panicular está situado justo por encima del nivel del suelo rodeado por las hojas y aparece una estructura cónica plumosa de 0,5 a 1,5 mm de longitud.
	Iniciación y diferenciación de la panícula	Del primordio se diferencian las espiguillas, las cuales forman con el raquis la inflorescencia que crece dentro de la vaina de la hoja bandera causando un abultamiento llamado “embuchamiento”.
	Paniculación	Cuando emerge la panícula de la vaina de la hoja bandera.
	Antésis	Salida de las anteras de apariencia blanquecina, primero ocurre en el tercio superior y después en el tercio inferior.
Maduración	“Lechoso”	Granos de un color verde y la panícula cuando se sostiene vertical se dobla en un arco de 90° por el peso de los granos llenos en el tercio superior de la misma.
	Pastoso	La consistencia del grano cambia primero a pastosa suave y luego se endurece. El color de la espiga cambia a verdoso amarillento, la panícula dobla su punta en un arco de 180° y las ramas de la mitad del raquis a 90° formando un arco en su punta debido a que sus órganos incrementan su peso.
	Madurez del grano	Cuando el 90% de los granos han madurado y muestra un color rojo pajizo.

donde: $T_{\text{máxima}}$ es la temperatura máxima diaria del aire; $T_{\text{mínima}}$ es la temperatura mínima diaria del aire y T_{base} : temperatura base, es la temperatura en que el proceso de interés no se desarrolla y se tomó en este caso 10 °C, según Quintero (2009).

Los GDCA que caracterizan al desarrollo de cada cultivar, se lograron al calcular la media de esta variable a partir de los valores obtenidos para cada fecha de siembra.

3.3. Evaluación del crecimiento de las plantas y relación con las variables meteorológicas.

3.3.1. Dinámicas del crecimiento de cuatro cultivares de arroz en diferentes fechas de siembra y épocas.

Se establecieron las dinámicas de crecimiento de las plantas, a partir de los 25 días después de la emergencia (dde) y hasta la cosecha, a intervalos aproximados de 15 días, de plantas presentes en un marco de 0,25 m² por parcela experimental. Se determinó la masa seca (en gramos) por órgano (tallos, hojas y espigas) y de la parte aérea (sumatoria de los órganos de la planta), así como la superficie foliar (m²), estimada por la sumatoria del producto del ancho y el largo de las hojas activas, por 0,7 (García *et al.*, 2009). Los datos reales obtenidos, se ajustaron por medio del análisis de regresión, a una función matemática exponencial polinómica de segundo grado (ecuación 2) y se emplearon los días después de la emergencia como variable independiente.

$$y = e^{(b_0 + b_1x + b_2x^2)} \quad (2)$$

A partir de la primera y la segunda derivadas, de cada ecuación matemática obtenida, se estimaron los Índices del Análisis del Crecimiento, según las fórmulas

descritas por Torres (1989) y García *et al.* (1998), tales como, la Tasa Absoluta de Crecimiento (TAC) de la masa seca de tallos, hojas, parte aérea e IAF (ecuación 3); la Duración del Área Foliar (DAF) (ecuación 4) y la Tasa de Asimilación Neta (TAN) (ecuación 5).

$$TAC = \frac{dP}{dt} \text{ o } \frac{dA}{dt} \quad (3)$$

$$DAF = \int_i^{i_0} A \quad (4)$$

$$TAN = \frac{1}{A} * \frac{dP}{dt} \quad (5)$$

donde: (A) es el IAF, (P) masa seca del órgano o la parte aérea y (t) es el tiempo transcurrido desde la germinación, en días.

Además, se estimaron diferentes parámetros del crecimiento de las plantas tales como: el momento en el que se alcanzó la Tasa Absoluta de Crecimiento máxima y su valor en dicho punto; el valor de la Tasa de Asimilación Neta en los momentos de la Tasa Absoluta de Crecimiento máxima de la masa seca de la parte aérea, del Índice de Área Foliar máximo, y de la Tasa Absoluta de Crecimiento máxima del Índice de Área Foliar.

3.3.2. Coeficiente Fototérmico y la Eficiencia del Uso de la Radiación (EUR).

Se determinó la disponibilidad de la radiación solar global (Mj.m⁻²) para cada fase de desarrollo y el ciclo del cultivo, en las diferentes fechas de siembra a partir de la sumatoria de la radiación solar global diaria durante el período de cada fase.

La Radiación Fotosintéticamente Activa Media Interceptada por el cultivo diariamente (fi), se calculó a partir de la ecuación (6), según Boschetti *et al.*(2006); donde la k es

el coeficiente de absorción de la luz y , para el mismo, se utilizaron los valores calculados por estos autores para cultivares de tipo índica (0,43 en la etapa desde la emergencia hasta ahijamiento activo; 0,45 desde ahijamiento activo hasta “embuchamiento”; 0,49 desde “embuchamiento” hasta antesis y 0,64 desde antesis hasta cosecha). El IAF se estimó a partir de la función matemática de mejor ajuste a partir de los resultados en los experimentos realizados (epígrafe 3.3.1).

$$f_i = 1 - e^{-k \cdot \text{IAF}} \quad (6)$$

El Coeficiente Fototérmico (Q) se determinó como el promedio del cociente de la Radiación Fotosintéticamente Activa Media Interceptada por el cultivo (f_i) diaria, para el período comprendido entre los 20 días previos y los 10 días posteriores a la antesis, y la temperatura media menos la temperatura base de desarrollo, ecuación (7), según (Abbate *et al.*, 1995).

$$Q = \frac{f_i}{T_m - T_b} \quad (7)$$

Además, se determinó la Eficiencia del Uso de la Radiación (EUR), calculando la pendiente de la regresión lineal entre los valores de la masa seca de la parte aérea acumulada obtenida del ajuste de los datos reales en los diferentes experimentos realizados (acápito 3.3.1) y los valores de la Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida (APAR siglas en inglés) diarias en las etapas de desarrollo descritas para el cálculo de la f_i . El cálculo de la APAR se realizó a partir de la ecuación (8), según Sinclair y Muchow (1999). Se empleó para ello las magnitudes de K mencionadas anteriormente para distintos momentos de desarrollo del cultivo.

$$\text{APAR}_i = \text{PAR}_i * f_i \quad (8)$$

La PAR (siglas en Inglés), se consideró como el 45 % de la radiación global según Kiniry *et al.* (1989), y f_i se determinó a partir de la ecuación (6) teniendo en cuenta todo el ciclo del cultivo. Adicionalmente, se estudiaron las relaciones entre el Número de Granos Llenos por metro cuadrado y el Coeficiente Fototérmico.

3.4. Exportación de asimilados durante el desarrollo del grano desde los órganos vegetativos de la planta.

Se evaluó la variación de la masa seca de diferentes órganos del tallo principal en los experimentos con fechas de siembra diciembre del 2004, febrero del 2005 y enero del 2006, para la época “poco lluviosa” y en marzo 2006, abril 2008 y abril 2009, para la época “lluviosa”. Se seleccionaron e identificaron para estas determinaciones al inicio de paniculación, veinticinco plantas representativas por parcela en todos los tratamientos (Nagata *et al.*, 2001).

En cinco tallos principales seleccionados, en los diferentes momentos de muestreo (antesis, 10 y 20 días después de la misma), se le separaron los órganos y partes de estos: panícula, hoja bandera, vainas de las hojas, las restantes hojas presentes en el tallo y los tres entrenudos superiores enumerados del ápice a la base: pedúnculo (Ped.), primer entrenudo (Ent 1), segundo entrenudo (Ent 2) y tercer entrenudo (Ent 3). Estas muestras fueron colocadas en la estufa a 70°C hasta masa constante y posteriormente fueron pesadas en una balanza analítica. A las medias de los datos se les determinó el intervalo de confianza y fueron graficadas. Se determinó, en cada órgano y en las partes del mismo que fueron evaluadas de la planta, la variación de la masa seca después de la antesis (%) (masa seca en la antesis menos la masa seca a los 20 días después de la antesis (dda) entre la masa seca en la antesis).

Se estableció, la relación entre el rendimiento por planta (masa seca de la panícula en el momento de la cosecha) y el incremento de masa seca de la parte aérea (sumatoria de masa seca de las diferentes partes de los órganos de la planta) en el período de antesis a 20 dda, se aplicó un modelo teórico-fisiológico donde se relacionó el proceso de llenado del grano en función de la masa seca de la parte aérea durante esta fase del desarrollo del cultivo (Takami *et al.*, 1990).

La masa seca total de la planta (W) se dividió en sus dos componentes, masa seca del grano (G) y masa seca del resto de la planta (S), de manera que, la variación de la masa seca total de la planta, durante este período ($W_f - W_i$), se representa por la ecuación (9):

$$(W_f - W_i) = (G_f - G_i) + (S_f - S_i) \quad (9)$$

Donde, i y f , señalan el inicio y final de la fase de llenado del grano. La ecuación (9) se reordenó de la manera siguiente:

$$Y_r = (W_f - W_i) + (S_i - S_f) \quad (10)$$

donde Y_r es el rendimiento en grano y representa ($G_f - G_i$).

El modelo esbozado del rendimiento en grano como función de la producción de la masa seca durante el llenado del grano es una función de respuesta de Blackman (Takami *et al.*, 1990), con dos variables: Y_p , valor máximo del rendimiento potencial de granos; y T_p , masa seca de la planta (parte aérea) al inicio del período. De esta manera, para graficar la relación de los datos en una forma no dimensional, independiente de los valores de las variables, se generan dos nuevas coordenadas:

$$X = (W_f - W_i)/(Y_p - T_p); Z = (Y - T_p)/(Y_p - T_p) \quad (11)$$

Y_p se estimó por el número de granos de la planta (tomado de 10 panículas de plantas seleccionadas en el momento de la antesis) por la masa seca promedio de un grano (de las panículas seleccionadas se apartaron los granos llenos y de estos se separaron cuatro muestras de 100 gramos, aproximadamente, las que se secaron a 120 °C por dos horas hasta masa constante)

Este modelo expresa que si $0 \leq X < 1.0$, entonces $Z = X$; o si $X \geq 1.0$, entonces $Z = 1.0$

3.5. Estimación del rendimiento potencial para el cultivo del arroz en la localidad de Los Palacios y esquema bioclimático para la formación del rendimiento.

El Rendimiento Potencial (Y), se estimó por la fórmula descrita por Sheehy *et al.* (2004), a partir de la ecuación (12)

$$Y = IC \times EUR \quad (12)$$

donde IC es el Índice de Cosecha (cociente de la Masa Seca de Granos entre la Masa Seca de la Parte Área de la planta), en el momento de la cosecha de las plantas que se desarrollaron en un marco de 0,25 m², en cada parcela experimental.

Para EUR, se emplearon los valores determinados en el epígrafe 3.3.2.

A partir de los resultados del trabajo se desarrolló un esquema bioclimático de la formación del rendimiento en el cultivo, teniendo en cuenta los cultivares de ciclo corto y medio para cada época de siembra en la localidad de Los Palacios. En el esquema se resaltan las variables que en cada uno de los acápites mostró mayor relación con el rendimiento. Se utilizó el valor del rendimiento potencial en cada época y se emplearon los valores de los componentes de rendimiento según las

características que presentaron los cultivares. Para el caso de los GDCA se promediaron los valores para cada etapa teniendo en cuenta la clasificación del ciclo del cultivar. En cuanto al resto de las variables se emplearon valores promedio a partir de los alcanzados en cada época de siembra.

3.6. Análisis estadístico y manejo de datos.

Las medias de las variables evaluadas obtenidas por cultivar y fecha de siembra, se sometieron a análisis de varianza, teniendo en cuenta el diseño experimental empleado. A partir del error experimental resultante, se calculó el intervalo de confianza de las mismas. Se construyeron varias matrices de datos; 1) cultivares, duración de fases fenológicas y rendimiento, 2) cultivares, fechas de siembra, variables del crecimiento, calculadas o estimadas, y rendimiento, y 3) cultivares y variación de masa seca de diferentes órganos y rendimiento. Estas se procesaron por la técnica multivariada de Componentes Principales, mediante la representación de un Biplot. A partir de los resultados del Biplot de la matriz dos (rendimiento, variables del crecimiento), se utilizó el análisis de regresión, donde no se tuvo en cuenta la fecha de siembra de agosto del 2006, para determinar la relación entre las variables que mayor asociación presentaron, y poder predecir el valor de la variable dependiente, rendimiento en lo fundamental, a partir de variables conocidas.



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Evaluación del rendimiento agrícola y sus componentes.

El comportamiento del rendimiento agrícola y sus principales componentes aparece en las tablas 5 y 6, para las épocas “poco lluviosa” y “lluviosa”, respectivamente. De manera general estos indicadores variaron entre cultivares para una misma fecha de siembra, y entre épocas, por lo se comprobó que es difícil establecer un patrón definido de comportamiento a partir del papel que juega la interacción con las condiciones meteorológicas, en la definición de estos indicadores para un cultivar determinado.

En la época “poco lluviosa” (Tabla 5), se debe precisar que generalmente el mejor comportamiento lo alcanzaron los cultivares de ciclo corto con respecto a los de ciclo medio. Por otra parte, en la época “lluviosa” (Tabla 6), los valores del rendimiento agrícola y de los componentes, fueron inferiores a los alcanzados en la época “poco lluviosa”. En esta época, es posible destacar además, que no se pone de manifiesto la superioridad en cuanto al rendimiento de los cultivares de ciclo corto con respecto a los de ciclo medio observada en la época “poco lluviosa”. Según MINAG (2008), en Cuba los rendimientos agrícolas varían significativamente entre los meses de siembra. Se recomienda sembrar los cultivares de ciclo medio con alto potencial de rendimiento agrícola, preferiblemente, en diciembre y enero; a partir del mes de febrero, es que se propone comenzar las siembras con cultivares de ciclo corto con alto potencial de rendimiento. Sin embargo, partiendo de los resultados del presente estudio, se destaca la importancia de considerar a los cultivares de ciclo corto para comenzar las siembras en la época “poco lluviosa”, donde por lo general el ciclo

Tabla 5. Rango del rendimiento agrícola ($t \cdot ha^{-1}$) al 14 % de humedad del grano y sus principales componentes, de cultivares de arroz (*Oryza sativa* L.), sembrados en época “poco lluviosa”.

Cultivares	Paníc.m ²	G. llenos por paníc.	G. vanos por paníc.	Masa de 1000 g	Rend. ($t \cdot ha^{-1}$)
enero 2004					
INCA LP-5	395-417	75-81	4-6	28,7-29,3	5,9-6,3
Reforma	342-364	86-92	11-13	28,7-29,3	5,5-5,9
INCA LP-2	381-403	80-86	4-6	27,7-28,3	4,8-5,2
J-104	393-415	72-78	5-7	27,7-28,3	4,9-5,3
ESx	5,60*	1,60*	0,75*	0,14*	0,12*
Diciembre 2004					
INCA LP-5	419-463	76-86	5-9	29,5-30,5	6,0-6,4
Reforma	325-369	99-109	11-15	28,5-29,5	5,9-6,3
INCA LP-2	428-472	83-93	4-8	27,5-28,5	5,3-5,7
J-104	374-418	92-102	4-8	28,5-29,5	5,1-5,5
ESx	11,39*	2,31*	0,85*	0,27*	0,12*
febrero 2005					
INCA LP-5	363-381	78-82	2-6	29,4-30,6	5,8-6,2
Reforma	321-339	83-87	10-14	26,4-27,6	5,3-5,7
INCA LP-2	325-343	85-89	6-10	27,6-28,8	4,6-5,0
J-104	343-361	76-80	4-8	28,7-29,9	5,0-5,4
ESx	4,41*	1,17*	0,81*	0,30*	0,12*
enero 2006					
INCA LP-5	396-430	70-104	4-6	28,5-29,3	6,1-6,3
Reforma	328-362	90-124	7-9	29,1-29,9	6,0-6,2
INCA LP-2	404-438	64-98	6-8	29,0-29,8	5,5-5,7
J-104	409-443	57-91	7-9	30,6-31,4	5,6-5,8
ESx	8,50*	8,53*	0,38*	0,21*	0,07*

Rango calculado a partir de la media y su intervalo de confianza al 95 % de probabilidad teniendo en cuenta el error experimental del análisis de varianza.

Tabla 6. Rango del rendimiento agrícola ($t.ha^{-1}$) al 14 % de humedad del grano y sus principales componentes, de cultivares de arroz (*Oryza sativa* L.), sembrados en época "lluviosa".

Cultivares	Paníc.m ²	G. llenos por paníc.	G. Vanos por paníc.	Masa de 1000 g	Rend. ($t.ha^{-1}$)
marzo 2006					
INCA LP-5	319-330	65-67	7-9	28,7-29,5	4,6-5,0
Reforma	304-315	69-71	13-15	26,7-27,5	4,0-4,4
INCA LP-2	300-311	69-71	7-9	27,1-27,9	3,6-4,0
J-104	325-336	64-66	7-9	27,8-28,6	4,4-4,8
ESx	2,82*	0,75*	0,69*	0,20*	0,10*
agosto 2006					
INCA LP-5	296-314	74-78	11-13	28,6-29,4	4,3-4,7
Reforma	290-309	78-82	11-13	27,3-28,1	3,9-4,3
INCA LP-2	314-332	70-74	12-14	26,5-27,3	3,5-3,9
J-104	328-346	68-72	6-8	27,4-28,2	4,4-4,8
ESx	4,40*	1,08*	0,69*	0,22*	0,10*
abril 2007					
INCA LP-5	345-363	66-70	9-11	28,7-29,5	4,5-4,9
Reforma	306-324	75-79	11-13	27,4-28,2	3,8-4,2
INCA LP-2	336-354	69-73	8-10	27,1-27,9	3,6-4,0
J-104	348-366	67-71	5-7	28,6-29,4	4,1-4,5
ESx	4,43*	0,97*	0,70*	0,19*	0,10*
abril 2008					
INCA LP-5	311-329	74-78	11-13	27,9-28,5	4,4-4,8
Reforma	291-309	79-83	13-15	26,5-27,1	4,0-4,4
INCA LP-2	334-352	69-73	15-17	26,7-27,3	3,7-4,1
J-104	335-353	70-74	15-17	27,8-28,4	4,3-4,7
ESx	4,80*	1,24*	0,76*	0,17*	0,10*
abril 2008					
INCA LP-5	335-355	68-74	13-17	27,4-29,0	4,5-5,1
Reforma	287-307	81-87	12-16	27,4-29,0	4,1-4,7
INCA LP-2	329-349	68-74	10-14	24,1-25,7	3,1-3,7
J-104	308-328	73-79	17-21	28,3-29,9	3,9-4,5
ESx	4,90*	1,40*	0,84*	0,43*	0,13*

Rango calculado a partir de la media y su intervalo de confianza al 95 % de probabilidad teniendo en cuenta el error experimental del análisis de varianza.

del cultivo del arroz tiende a alargarse independientemente de las características del cultivar que se utilice; sobre todo, porque así se logra alcanzar un ahorro en insumos; fundamentalmente del agua utilizada para el riego.

En este sentido Acevedo *et al.* (2010; 2011), a partir de diferentes estudios en el cultivo, destacan la superioridad en cuanto al rendimiento de cultivares de ciclo corto con respecto a los de un ciclo mayor. También, Morejón y Díaz (2013) resaltan los mayores rendimientos alcanzados por los cultivares de menor ciclo sembrados bajo condiciones de producción en la época “poco lluviosa”, en estudios realizados en la misma localidad en la que se realizó el presente trabajo. Por tanto, obtener cultivares con un menor ciclo y alto potencial de rendimiento, resulta un aspecto importante en los objetivos del mejoramiento genético.

De manera general, en la mayoría de los casos, los cultivares alcanzaron menor cantidad de granos totales por panícula (granos vanos más granos llenos) que lo informado en la literatura (Tabla 3), y además, existieron diferencias en cuanto al comportamiento de esta variable, tanto entre cultivares como entre fechas de siembra y el vaneo no superó el 15 %, valor aceptable para los cultivares sembrados en Cuba (MINAG, 2005).

El que se haya presentado un menor número de panículas por m² y de granos totales, indican limitaciones en el establecimiento del sumidero por unidad de superficie sembrada y por unidad de espiga, más marcado en la época “lluviosa”. Sin embargo, resulta importante destacar el caso del cultivar Reforma, que en casi todas las fechas de siembra presentó la menor cantidad de panículas por m², aunque fue uno de los de mayor cantidad de granos llenos por panícula y en oportunidades

también de elevado porcentaje de estos, aspecto que demuestra el carácter compensatorio entre los componentes del rendimiento que se establece en el cultivo del arroz, donde las características de cada cultivar, unido a las condiciones de cultivo, juegan un papel importante en dicho comportamiento, elementos que han sido también señalados por varios autores (Ramírez *et al.*, 1998; Morejón *et al.*, 2005, 2012).

Al respecto, en trabajos realizados en Cuba se ha demostrado que la cantidad de panículas por m² es el componente más variable y generalmente junto a los granos llenos por panícula, es la causa principal que limita el rendimiento agrícola en el país (MINAG, 2008). Además, atendiendo a lo señalado por Briceño y Álvarez (2010), quienes establecen que aspectos relacionados con la panícula (número de ramas primarias, secundarias, número de granos llenos, masa de los granos, entre otros), varían de acuerdo con diferentes factores como época de siembra, nutrición y principalmente, por el tipo de cultivar y sus características de crecimiento.

Por tal motivo, será necesario ajustar las densidades de siembra, teniendo en cuenta las características del crecimiento de un cultivar en determinada localidad, con vistas a lograr un valor adecuado de tallos fértiles, lo que resulta elemental para asegurar altos rendimientos. Este aspecto corrobora los resultados de Polón *et al.* (2012), que resaltan a los tratamientos en los que se alcanzaron mayor población de plantas, como los de mayores rendimientos. Algunos autores (Cuevas, 1999; Polón y Castro 1999; Yamagata 1999; Polón *et al.*, 2003), señalaron la relación directa que existe entre la población de plantas, que finalmente posibilitan un mayor número de panículas por m² y de rendimiento.

Toda esta variabilidad encontrada, puede estar relacionada con la duración de las fases y el comportamiento del clima en el período que duraron las mismas. Por lo que combinar esto en un cultivar para que presente el carácter de precocidad, niveles óptimos en el ahijamiento y capacidad de rendimiento, es todavía un desafío para los mejoradores.

4.2. Desarrollo fenológico, respuesta a la temperatura y determinación de los grados días de calor acumulados (GDCA) para el desarrollo de las fases.

4.2.1. Duración de las fases fenológicas de los cultivares estudiados.

Las tablas 7 y 8 muestran la duración de las fases fenológicas del cultivo, según los meses de siembra, en las épocas “poco lluviosa” y “lluviosa”, respectivamente. De las tres fases, la vegetativa fue la de mayor duración, aunque de manera general fue más corta en época “lluviosa” en comparación con la “poco lluviosa” y para cultivares de ciclo corto en comparación con los de ciclo medio.

La fase reproductiva, como media de los cultivares en cada fecha de siembra, generalmente fue mayor de 25 días, y no sobrepasó los 42 días en la época “poco lluviosa” (Tabla 7); por otra parte, en la época “lluviosa” nunca fue menor de 24 días y no sobrepasó los 44 días (Tabla 8). Sin embargo, en estos rangos, el comportamiento de los cultivares sufrió variaciones por efecto de las condiciones de cultivo en las fechas de siembra específicas. La fase de maduración para todos los cultivares y fechas de siembra, tuvo una duración entre 20 y 29 días, en la época “poco lluviosa” (Tabla 7), mientras que en la “lluviosa” estuvo entre 23 y 38 (Tabla 8). Estos resultados no coinciden con lo que está establecido hasta el momento para el cultivo del arroz, ya que en la literatura se destaca que las fases reproductiva y de

Tabla 7. Rango de la duración del ciclo (días) de diferentes cultivares de arroz (*Oryza sativa* L) en diferentes fechas de siembra. Época “poco lluviosa”.

Cultivares	Fase Vegetativa	Fase Reproductiva	Fase Maduración	Ciclo
enero 2004				
INCA LP-5	84-90	33-37	20-22	151-155
Reforma	84-90	28-32	20-22	136-140
INCA LP-2	89-95	26-30	24-26	146-150
J-104	97-103	25-29	21-23	147-151
ESx	1,37*	0,82*	0,47*	1,05*
diciembre 2004				
INCA LP-5	86-92	40-42	20-22	147-155
Reforma	84-90	35-37	22-24	142-150
INCA LP-2	91-97	36-38	23-25	151-159
J-104	98-104	40-42	24-26	164-172
ESx	1,41*	0,65*	0,48*	2,08*
febrero 2005				
INCA LP-5	80-86	30-32	24-26	137-141
Reforma	77-83	29-31	24-26	133-137
INCA LP-2	85-91	31-33	23-25	142-146
J-104	92-98	29-31	21-23	145-149
ESx	1,49*	0,31*	0,40*	1,25*
enero 2006				
INCA LP-5	69-79	37-39	27-29	134-142
Reforma	69-79	35-37	27-29	134-142
INCA LP-2	78-88	35-37	27-29	143-151
J-104	92-102	35-37	23-25	153-161
ESx	2,40*	0,64*	0,53*	2,01*

Rango calculado a partir de la media y su intervalo de confianza al 95 % de probabilidad teniendo en cuenta el error experimental del análisis de varianza.

Tabla 8. Rango de la duración del ciclo (días) de diferentes cultivares de arroz (*Oryza sativa* L) en diferentes fechas de siembra. Época “lluviosa”.

Cultivares	Fase Vegetativa	Fase Reproductiva	Fase Maduración		Ciclo
marzo 2006					
INCA LP-5	63-73	38-44	31-35		138-146
Reforma	63-73	33-39	24-28		126-134
INCA LP-2	83-93	24-30	30-34		143-151
J-104	85-95	26-32	26-30		143-151
ESx	2,74*	1,41*	0,70*		1,81*
agosto 2006					
INCA LP-5	57-63	31-33	26-30		116-124
Reforma	53-59	28-30	32-36		115-123
INCA LP-2	66-72	28-30	27-31		123-131
J-104	68-74	29-31	34-38		133-141
ESx	1,63*	0,37*	0,89*		1,90*
abril 2007					
INCA LP-5	61-65	27-29	27-29		114-120
Reforma	57-61	25-27	31-33		114-120
INCA LP-2	63-67	30-32	26-28		120-126
J-104	70-74	31-33	26-28		128-134
ESx	1,16*	0,65*	0,62*		1,49*
abril 2008					
INCA LP-5	63-69	33-35	26-28		124-130
Reforma	59-65	32-34	27-29		120-126
INCA LP-2	73-79	28-30	23-25		126-132
J-104	74-80	31-33	29-31		136-142
ESx	1,69*	0,48*	0,60*		1,53*
abril 2008					
INCA LP-5	59-69	32-36	28-30		123-131
Reforma	52-62	25-29	31-33		112-120
INCA LP-2	70-80	27-31	25-27		126-134
J-104	80-90	27-31	24-26		135-143
ESx	2,76*	0,88*	0,70*		2,17*

Rango calculado a partir de la media y su intervalo de confianza al 95 % de probabilidad teniendo en cuenta el error experimental del análisis de varianza.

maduración no sufren variación en función de las fechas de siembra y tienen una duración de 30 días, solo la fase vegetativa se caracteriza por su variabilidad (Aguilar, 2001; MINAG, 2008).

Sobre la duración del ciclo, hay que destacar que los cultivares al ser sembrados en diciembre 2004; tuvieron una mayor duración que cuando fueron sembrados en el resto de los meses que se estudiaron aspecto que pudiera tener relación con los valores de rendimiento agrícola alcanzados en esa fecha.

Para las condiciones de Cuba también se definen los ciclos del cultivo como ciclo corto, para cultivares con menos de 130 días, y medio, para aquellos cuya duración se encuentra entre 130-150 días, solo en época “poco lluviosa” (MINAG, 2008). En cuanto a la duración del ciclo, los cultivares INCA LP-5 y Reforma (considerados como cultivares de ciclo corto) superaron los 130 días. Los cultivares INCA LP-2 y J-104, al ser sembrados en diciembre del 2004 superaron los 150 días, incluso J-104 mantuvo este comportamiento en la siembra de enero 2006. Teniendo en cuenta lo anterior, no se debe establecer un patrón regular en cuanto a la duración de las fases y del ciclo de los cultivares, ya que depende, en gran medida, de las fechas de siembra que se utilicen para el cultivo.

En este sentido, las condiciones ambientales existentes en un determinado período pueden acercar o alejar las diferencias en cuanto a la duración del ciclo. Todo esto está motivado a que el desarrollo de un cultivar es condicionado por alteraciones en el orden bioquímico fisiológico que presenta el genotipo en función de su interacción con el ambiente.

Resultados publicados por Franco y Ramírez (2000), destacan que cultivares de ciclo corto se comportan como los de ciclo medio en la época “poco lluviosa”. Polón *et al.* (2003), informaron un alargamiento del ciclo del cultivo en los cultivares INCA LP-5 y J-104 en la época “poco lluviosa”. Sin embargo, en los trabajos realizados por estos autores no se precisaron las causas de este comportamiento, ni tampoco si existieron variaciones en la duración de las fases, las que también pueden contribuir al alargamiento del ciclo.

Al determinar el grado de asociación entre la duración de las fases y el ciclo del cultivo con el rendimiento (Figura 3), se pudo constatar que en la época “poco lluviosa” el rendimiento se asoció positivamente con la duración de la fase de maduración. Esto evidencia que bajo las condiciones de esta época, el tiempo de duración del llenado de los granos tiene un papel determinante en el rendimiento. Por tanto, la actividad de los órganos que actúan como fuente, son de relativa importancia para lograr el mismo, partiendo del resultado del balance de la fotosíntesis, respiración y fotorespiración, como aspecto fundamental en el metabolismo del carbono en el tipo de planta C₃, como es el caso del arroz.

Sin embargo, es importante precisar además, que según los resultados en dicha época, la respuesta de la planta en la fase de maduración pudiera ser limitada por un aumento de la duración de la fase vegetativa.

En la época “lluviosa”, la mejor asociación con el rendimiento estuvo dada por la duración de la fase reproductiva, lo que indica que bajo las condiciones de esta época un papel determinante pudiera tener el tamaño de los sumideros, ya que es en

esta fase donde se decide la cantidad de panículas y el total de granos por panícula en cada cultivar.

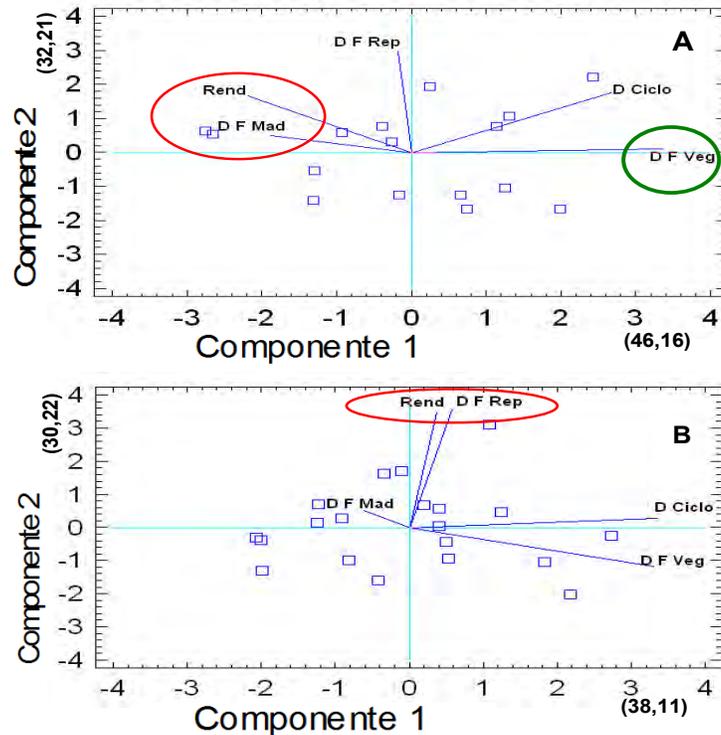


Figura 3. Asociación del rendimiento agrícola y la duración de las fases fenológicas de plantas de arroz (*Oryza sativa* L.) a partir del análisis de componentes principales representado por un Biplot en las épocas “poco lluviosa” (A) y “lluviosa” (B). D F Rep.: duración de la fase reproductiva (días). D F Mad.: duración de la fase de maduración (días). D Ciclo.: duración del ciclo (días). Rend.: rendimiento (t.ha⁻¹). Contribución porcentual de cada componente, época “poco lluviosa” n=16, Época “lluviosa” n=20.

Resulta importante señalar la fuerte asociación que existe en ambas épocas de siembra con las fases finales de desarrollo, aspecto que demuestra la importancia del tamaño y la actividad del sumidero y la capacidad de las fuentes para cumplir con sus requerimientos en la obtención de altos rendimientos. En este sentido aumentar la capacidad y eficiencia fotosintética del cultivo, así como optimizar la partición de asimilados, constituyen propuestas fundamentales para el incremento de los rendimientos (Foulkes *et al.*, 2002, 2011; Parry *et al.*, 2011).

El comportamiento irregular en cuanto a la duración de las fases y el ciclo del cultivo en estos cultivares, puede estar relacionado con la temperatura en las distintas fechas de siembra; ya que el ciclo de los cultivos se afecta de manera importante por este factor ambiental, lo que puede provocar un alargamiento o acortamiento en las fases que dan lugar al período de vida de la planta (Valdez *et al.*, 2012).

4.2.2. Influencia de la temperatura en la duración de las fases fenológicas.

Al evaluar el comportamiento de las temperaturas máximas y mínimas diarias, durante todo el ciclo del cultivo (Figuras 4, 5, 6, 7 y 8), se observaron diferencias para las fechas de siembra en cada una de las épocas.

De forma general, las plantas sembradas en diciembre del 2004 se expusieron a menores valores de temperatura durante todo su ciclo, y se observó una mayor duración del mismo, si se compara con el resto de las fechas de siembra dentro de la época “poco lluviosa”, donde las temperaturas fueron más elevadas y la duración del ciclo fue más precoz.

De igual forma para la época “lluviosa”, las plantas sembradas en marzo del 2006 estuvieron expuestas durante la mayor parte de su ciclo de vida a valores de temperatura inferiores al resto de las fechas de siembra y presentaron una mayor duración de las fases de crecimiento. Estos resultados avalan los estudios realizados con el cultivar Fedearroz, en Colombia; donde se resaltó que cuando éste se sembró bajo condiciones de temperatura entre 20 y 36 °C, el período de desarrollo tuvo un rango de 127 a 135 días, mientras que cuando las temperaturas oscilaron entre 16 y 32 °C este periodo estuvo entre los 140 y 150 días (Salive, 2000).

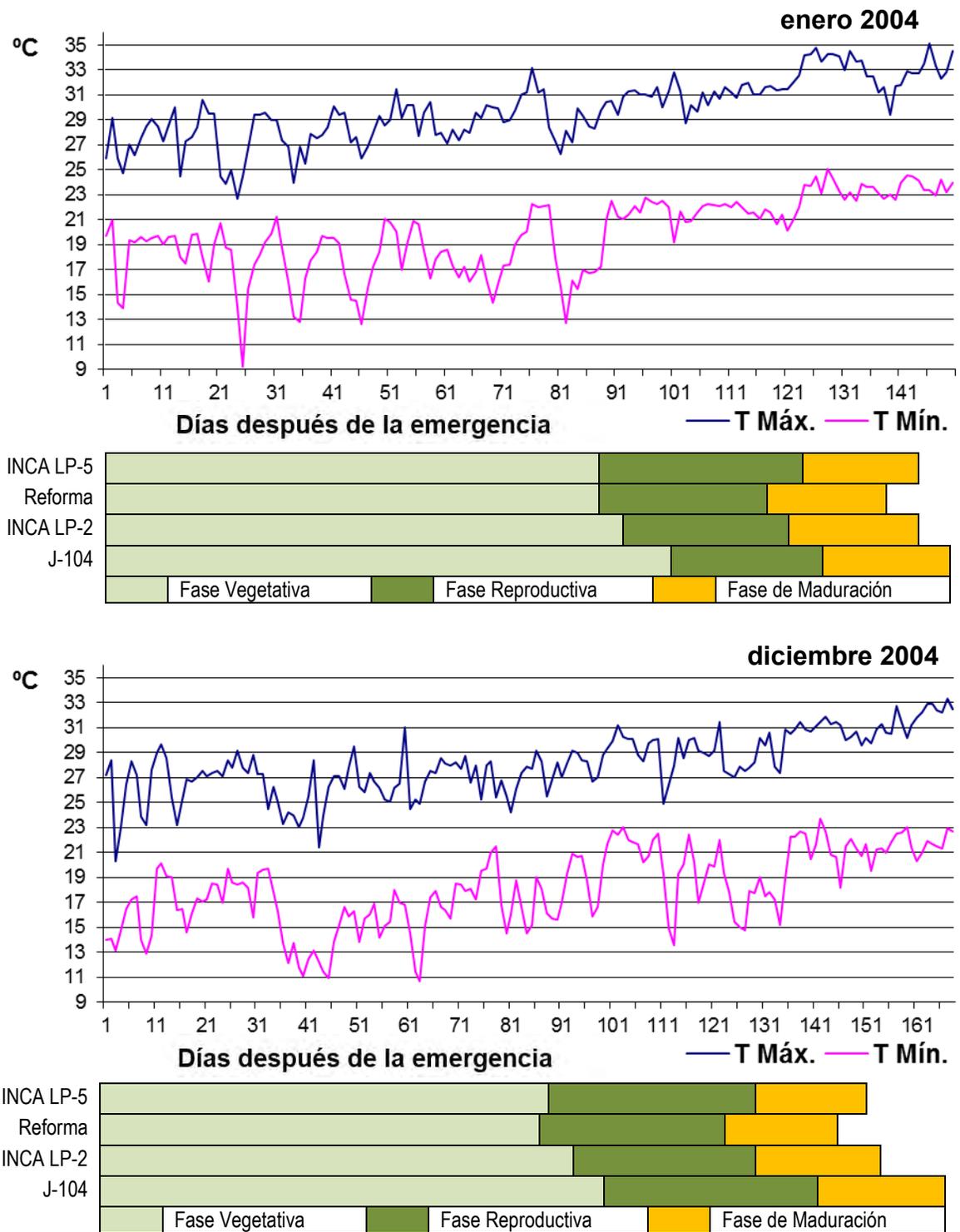


Figura 4. Temperaturas máxima y mínima del aire, diurnas, en cada fase fenológica del desarrollo de cultivares de arroz (*Oryza sativa* L.), en las fechas de siembra enero 2004 y diciembre 2004 (época “poco lluviosa”).

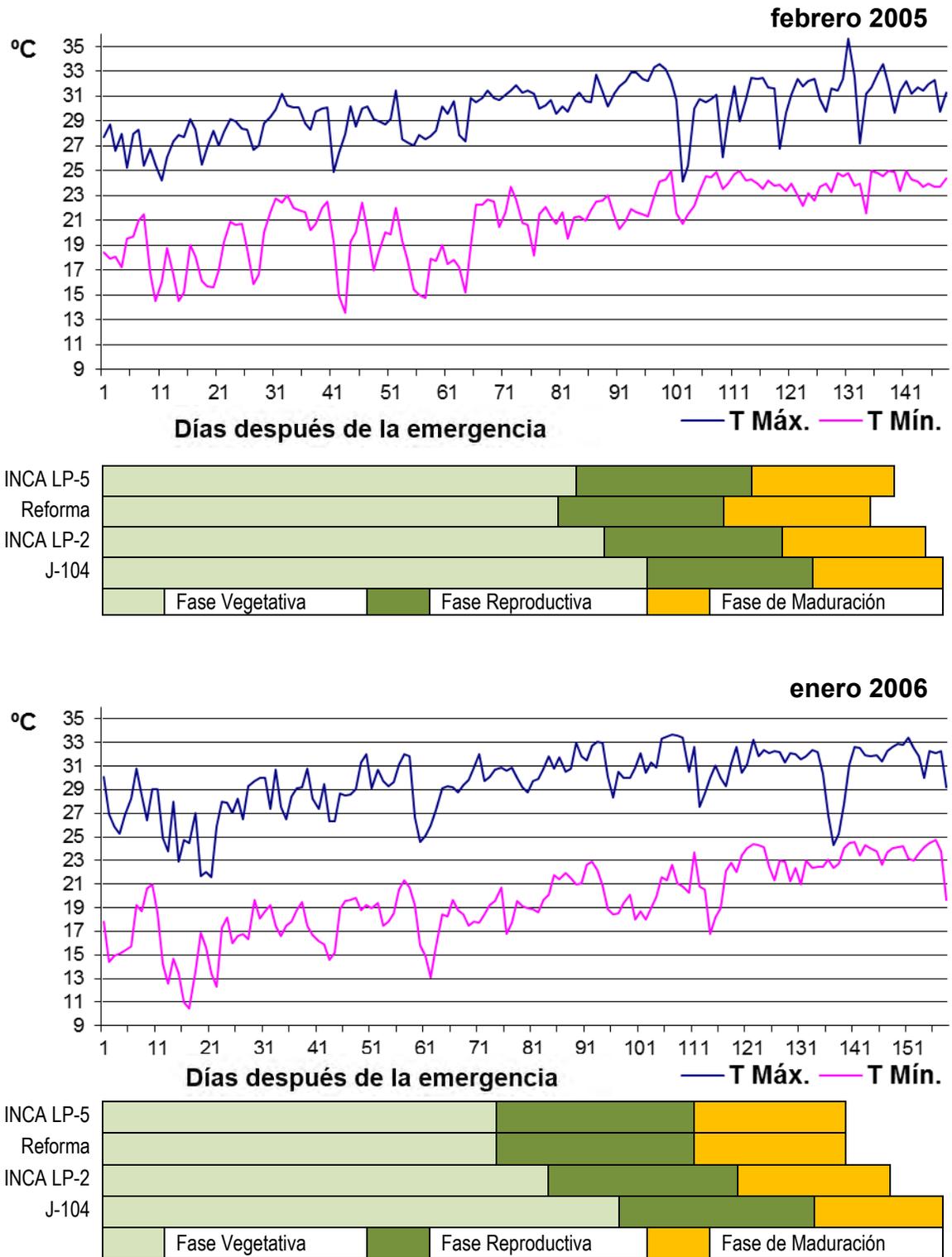


Figura 5. Temperaturas máxima y mínima del aire, diurnas, en cada fase fenológica del desarrollo de cultivares de arroz (*Oryza sativa* L.), en las fechas de siembra febrero 2005 y enero 2006 (época “poco lluviosa”).

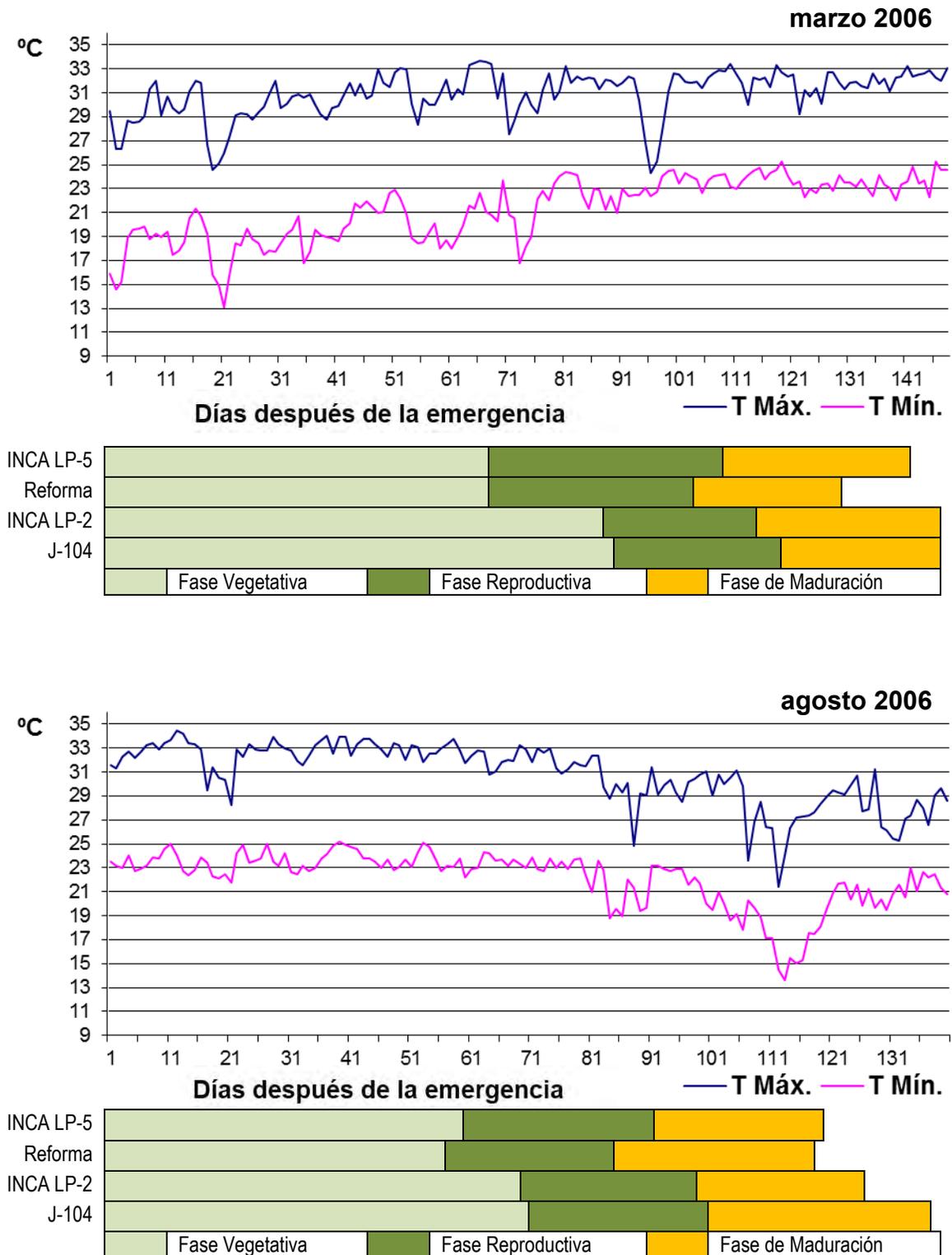


Figura 6. Temperaturas máxima y mínima del aire, diurnas, en cada fase fenológica del desarrollo de cultivares de arroz (*Oryza sativa* L.), en las fechas de siembra marzo 2006 y agosto 2006 (época “lluviosa”).

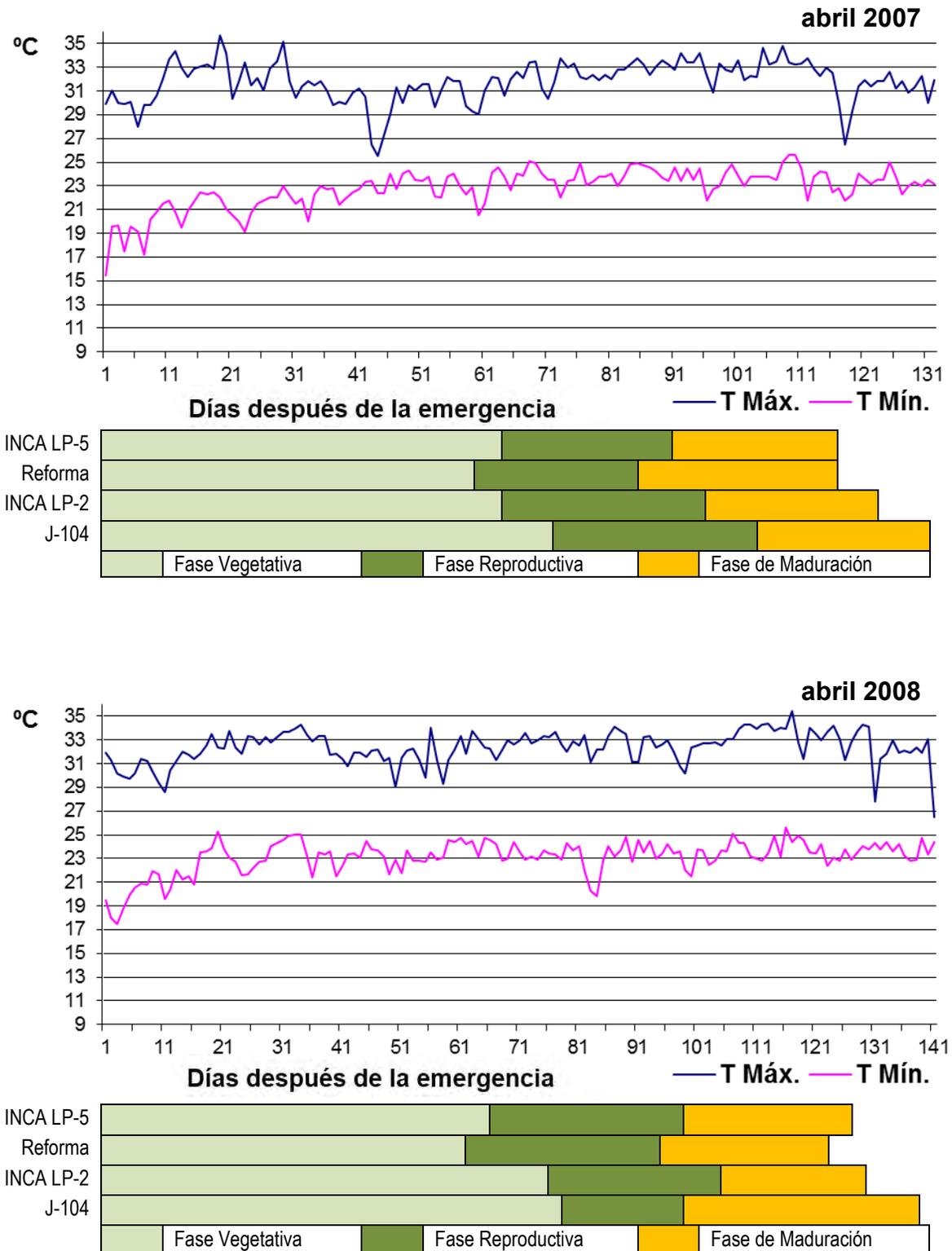


Figura 7. Temperaturas máxima y mínima del aire, diurnas, en cada fase fenológica del desarrollo de cultivares de arroz (*Oryza sativa* L.), en las fechas de siembra abril 2007 y abril 2008 (época “lluviosa”).

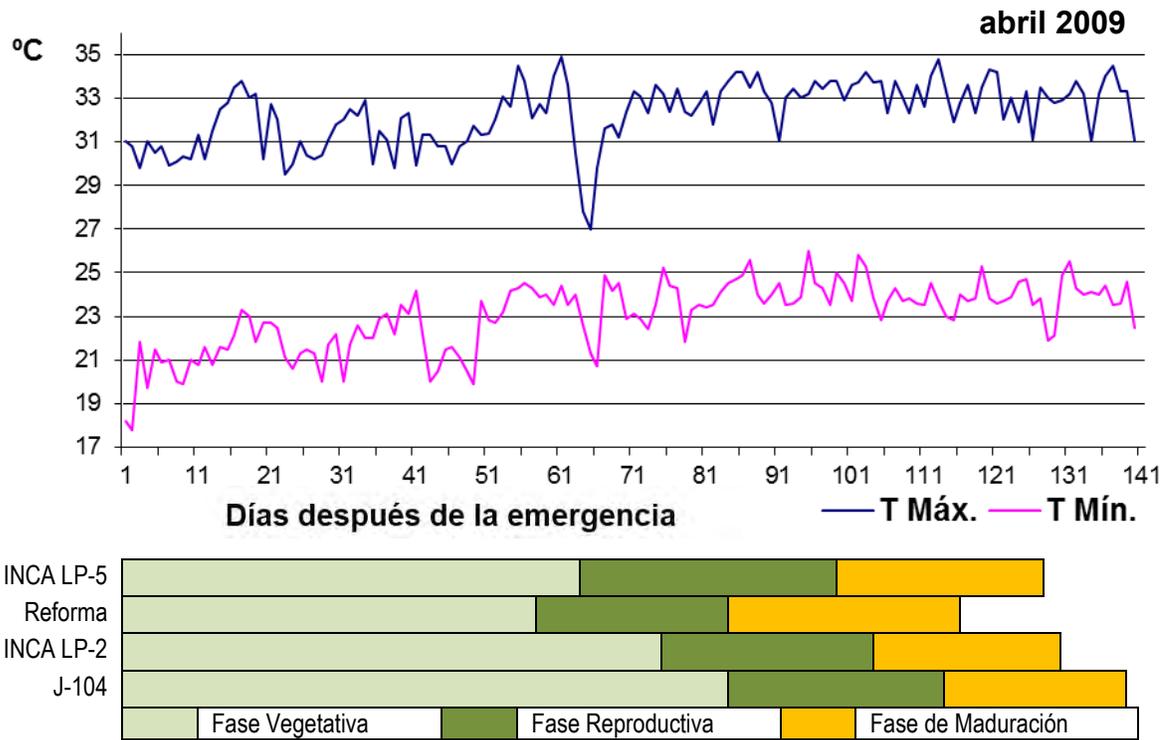


Figura 8. Temperaturas máxima y mínima del aire, diurnas, en cada fase fenológica del desarrollo de cultivares de arroz (*Oryza sativa* L.), en la fecha de siembra abril 2009 (época “lluviosa”).

A partir de los resultados anteriores, se puede destacar que existe una amplia variación en la duración de las fases del cultivo del arroz en estas fechas de siembra, debido a la influencia, en lo fundamental de la temperatura; por lo que resulta evidente que cada fase de desarrollo requiere de un mínimo de temperaturas acumuladas para llegar a su término y que la planta pueda pasar a la fase siguiente (Valdez *et al.*, 2012).

4.2.3. Grados días de calor acumulados (GDCA) para el desarrollo de cada fase y etapa.

La figura 9, muestra GDCA a partir del cálculo de los grados días de calor (°C) en las diferentes etapas de las fases fenológicas, para los cultivares estudiados, en cada época de siembra. En las etapas de plántula e inicio de ahijamiento, no se encontraron diferencias entre los cultivares en las dos épocas de siembra. La época "lluviosa" provoca mayor variación entre cultivares en las etapas de ahijamiento activo y máximo ahijamiento. En las demás etapas, sobresale el cultivar J-104 con mayores valores que el resto de los cultivares en dicha época.

Los GDCA para cada uno de los cultivares en las dos épocas de siembra, resultan muy similares y no existen diferencias entre las mismas para las etapas de crecimiento. A partir de lo anterior, en la tabla 9 se muestran los valores de GDCA promedio para que cada cultivar pueda completar las etapas de las fases fenológicas. Los cultivares requieren un rango de calor acumulado para completar su ciclo biológico que oscila entre 2000 y 2300 °C, aunque teniendo en cuenta que INCA LP-5, Reforma e INCA LP-2 solo llegan hasta 2200 °C, se pudieran agrupar

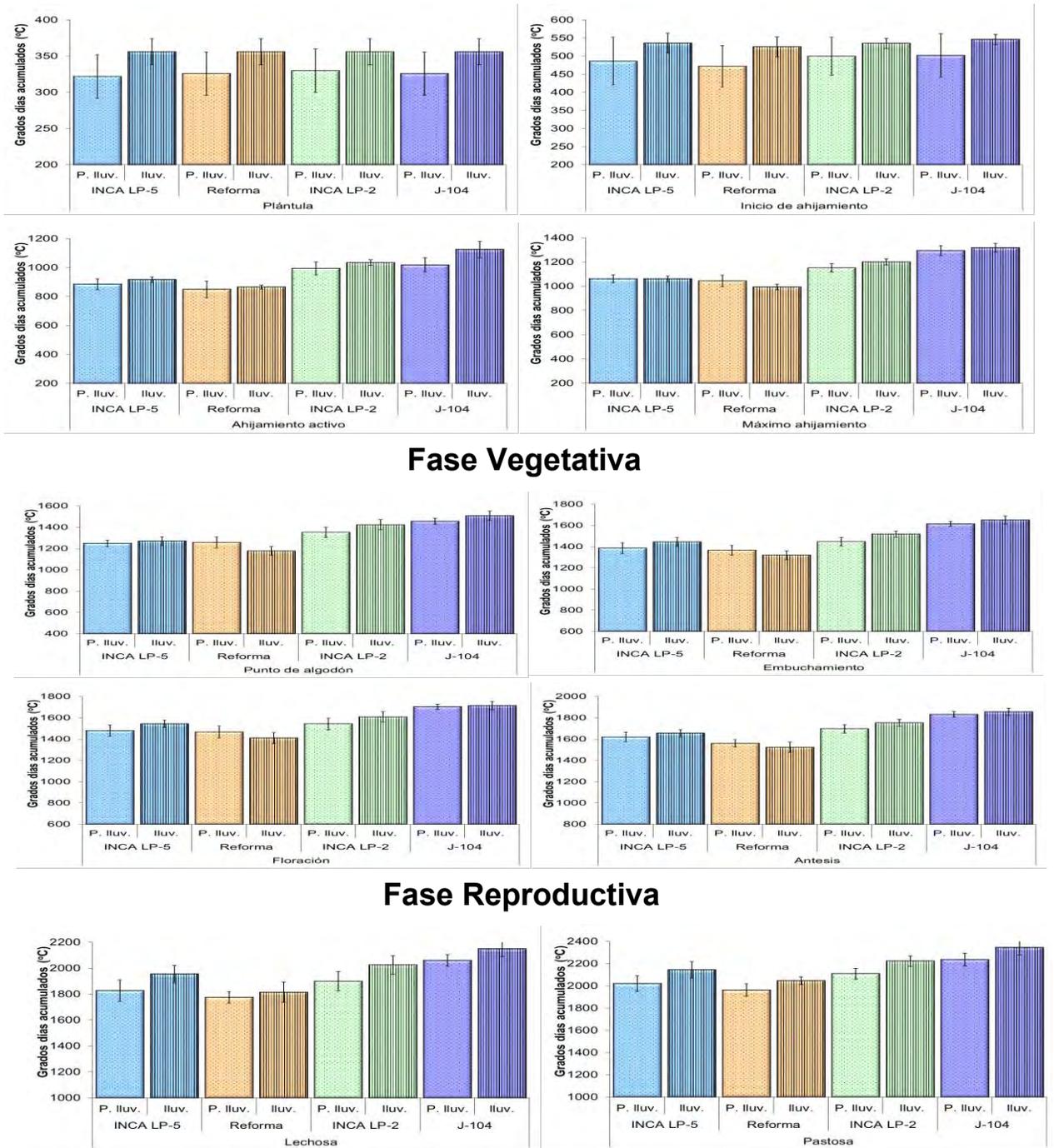


Figura: 9 Grados días de calor acumulados (GDCA, °C) en cada etapa y fase fenológica de cultivares de arroz (*Oryza sativa* L.) en las épocas “poco lluviosa” y “lluviosa”. GDCA calculados a partir de la temperatura máxima, mínima y de base (10 °C), medias de cuatro y cinco fechas de siembra para las épocas “poco lluviosa” y “lluviosa”, respectivamente y las barras significan intervalos de confianza a $p < 0,05$.

como cultivares que necesitan un rango de temperatura similar; mientras que J-104 como requiere valores cercanos a 2300 °C, pudiera agruparse con otros cultivares de un ciclo más largo, que requieren mayor GDCA. Esto facilita la planificación de las actividades de manejo teniendo en cuenta el comportamiento de la temperatura.

Resultados en siete estaciones de Japón, distribuidas de norte a sur (JICA, 2007), señalan que un arrozal puede exigir de 3 300 a 4 490 grados días acumulados para su crecimiento; sin embargo, destacan que los recientes avances en el mejoramiento genético del cultivo han logrado reducir esas exigencias a un 50 %. Actualmente en este país son suficientes 2 400 °C para completar el ciclo en los nuevos cultivares y obtener una buena cosecha.

Tabla 9. Grados días de calor acumulados (GDCA, °C) para completar las fases y sus etapas fenológicas en cuatro cultivares de arroz (*Oryza sativa* L.). ± representa el intervalo de confianza de las medias, n=9.

Fases	Etapas	INCA LP-5	Reforma	INCA LP-2	J-104
	Plántula	358±19	359±18	359±18	359±18
	Inicio ahijamiento	525±43	518±41	536±40	543±40
	Ahijamiento Activo	902±37	858±36	990±42	1081±47
Vegetativa	Máximo ahijamiento	1062±25	1017±24	1201±34	1309±26
	Punto de algodón	1286±35	1226±35	1382±36	1490±35
	“Embuchamiento”	1411±34	1359±31	1489±41	1622±31
	Paniculación	1511±32	1458±39	1584±44	1722±26
Reproductiva	Antesis	1636±28	1557±31	1712±29	1833±23
	“Lechosa”	1900±57	1810±49	1960±56	2091±42
Maduración	Pastosa	2080±43	2013±32	2166±39	2287±32

En estudios realizados en Cuba con el cultivar J-104, Canet y Franco (2002) determinaron valores de GDCA en un rango de 2 722 a 3 734 °C. Estos autores destacan que se apreciaron diferencias entre los valores alcanzados según la fecha

de siembra y precisaron que en los meses de temperatura más bajas se requería acumular más temperatura que en los meses con temperaturas superiores.

Los aspectos informados anteriormente no coinciden con los valores de GDCA destacados por Soto *et al.* (2009) para trigo, ni con los resultados de este trabajo. Los cuales son muy similares a los alcanzados por Wells (1996) en estudios realizados con cultivares de características semejantes a las empleadas en la presente investigación, donde se definen valores muy cercanos a los determinados en este estudio, a pesar de que las condiciones del clima en la zona donde se realizaron los estudios fueron diferentes.

El rango de GDCA ha sido empleado para la estimación del momento en el que ocurren las etapas fenológicas críticas para la determinación del rendimiento en el cultivo del maíz y así se ha logrado el empleo oportuno de las distintas labores culturales (Yzarra *et al.*, 2009).

A partir de los resultados de este acápite, es posible explotar de manera conveniente las condiciones del clima en relación a las características genéticas de los cultivares y así aprovechar el período más idóneo para el desarrollo de las fases fenológicas del cultivo, la eficiencia y oportunidad en la aplicación de los insumos y la mano de obra a utilizar. Se pueden manejar las fechas de siembra y seleccionar los cultivares adecuados en determinada localidad; teniendo en cuenta el comportamiento de las temperaturas como elemento fundamental. Por lo tanto los cultivares que requieran menor acumulado de temperaturas para completar su ciclo deben ser sembrados en los meses de temperaturas más bajas, para que el período de establecimiento en el campo sea menor en comparación con otros cultivares que presenten una mayor

duración. Esto avala aún más lo que se destaca en el acápite 4.1 sobre la conveniencia de tener en cuenta la siembra de cultivares de ciclo corto al inicio de la época “poco lluviosa”. Además, también es posible, si se logra un seguimiento del comportamiento de la temperatura en la localidad, conocer con mayor precisión cuándo el cultivo está próximo a alcanzar una fase fenológica o una etapa dentro de la fase.

4.3. Evaluación del crecimiento de las plantas y relación con variables meteorológicas.

4.3.1. Dinámicas del crecimiento de cuatro cultivares de arroz en diferentes fechas de siembra y épocas.

Los resultados del análisis de regresión para la descripción del crecimiento en masa seca de los diferentes órganos de la parte aérea de las plantas se encuentran en el Anexo 3. Para la mayoría de los tratamientos, los R^2 fueron superiores a 0,90. Esto implica que un elevado porcentaje de la varianza total se explicó por la varianza de la regresión, y se logró un ajuste satisfactorio, tanto desde el punto de vista matemático como biológico.

En las Figuras 10, 11, 12 y 13, se presentan las dinámicas de la masa seca de tallos y hojas (valores estimados y reales para las épocas “poco lluviosa” y “lluviosa”) y las magnitudes de algunas variables derivadas de la descripción del crecimiento. Las variables de la masa seca mostraron un comportamiento sigmoideal con la edad del cultivo y se apreció una disminución de los valores al final del desarrollo de los órganos, en los diferentes cultivares, para la mayoría de las fechas de siembra. De forma general, se encontró una influencia de la fecha de siembra tanto en el valor

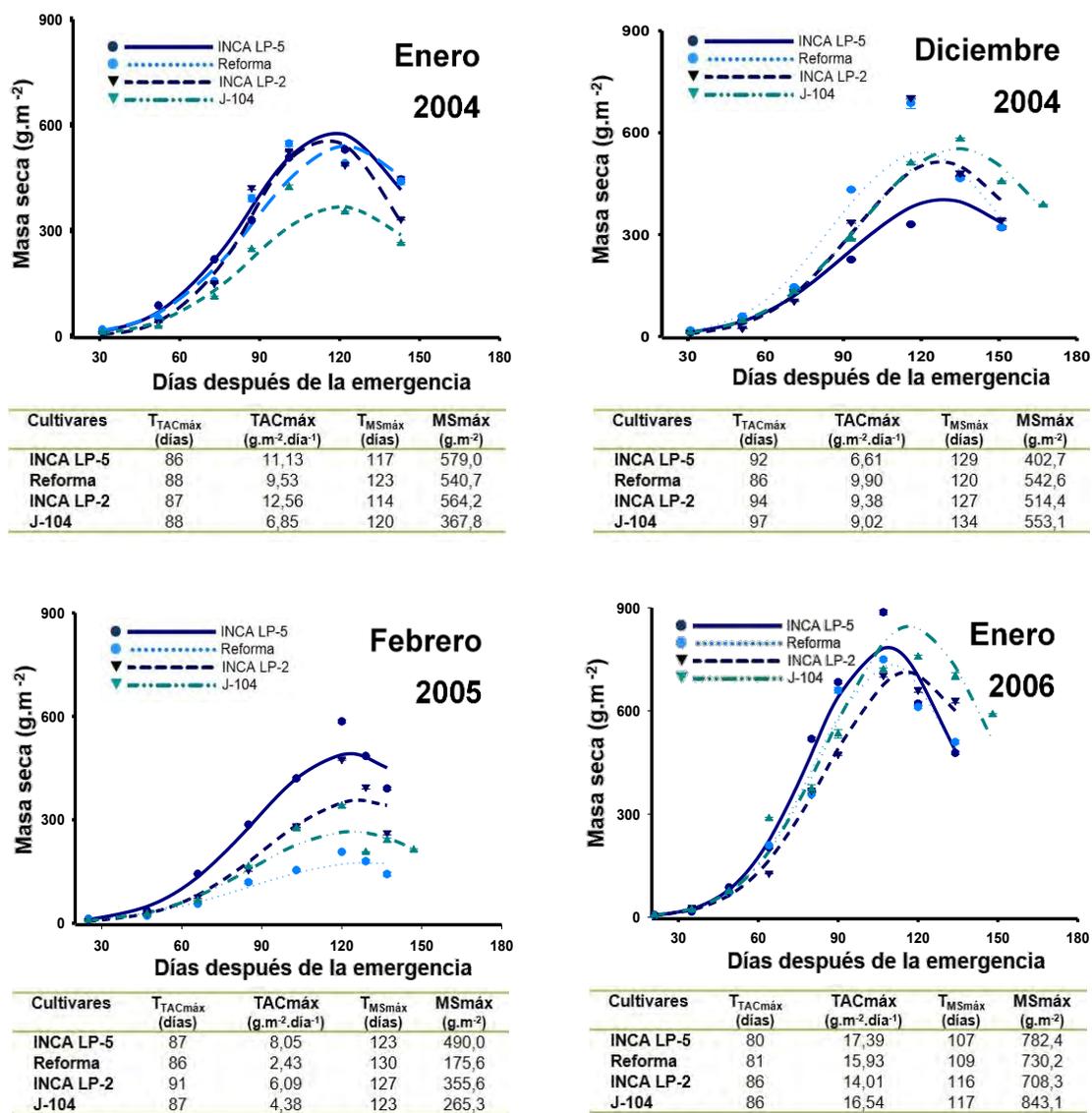


Figura 10. Dinámicas estimadas de la masa seca de tallos (g.m⁻²) de plantas de cultivares de arroz (*Oryza sativa* L.) en diferentes fechas de siembra en la época “poco lluviosa” y variables derivadas de las mismas. T_{TACmáx}: tiempo en el que se alcanza la máxima Tasa Absoluta de Crecimiento; TAC_{máx}: valor de la máxima Tasa Absoluta de Crecimiento; T_{MSmáx}: tiempo en el que se alcanza el valor máximo de Masa Seca; MSmáx: valor máximo de la Masa Seca.

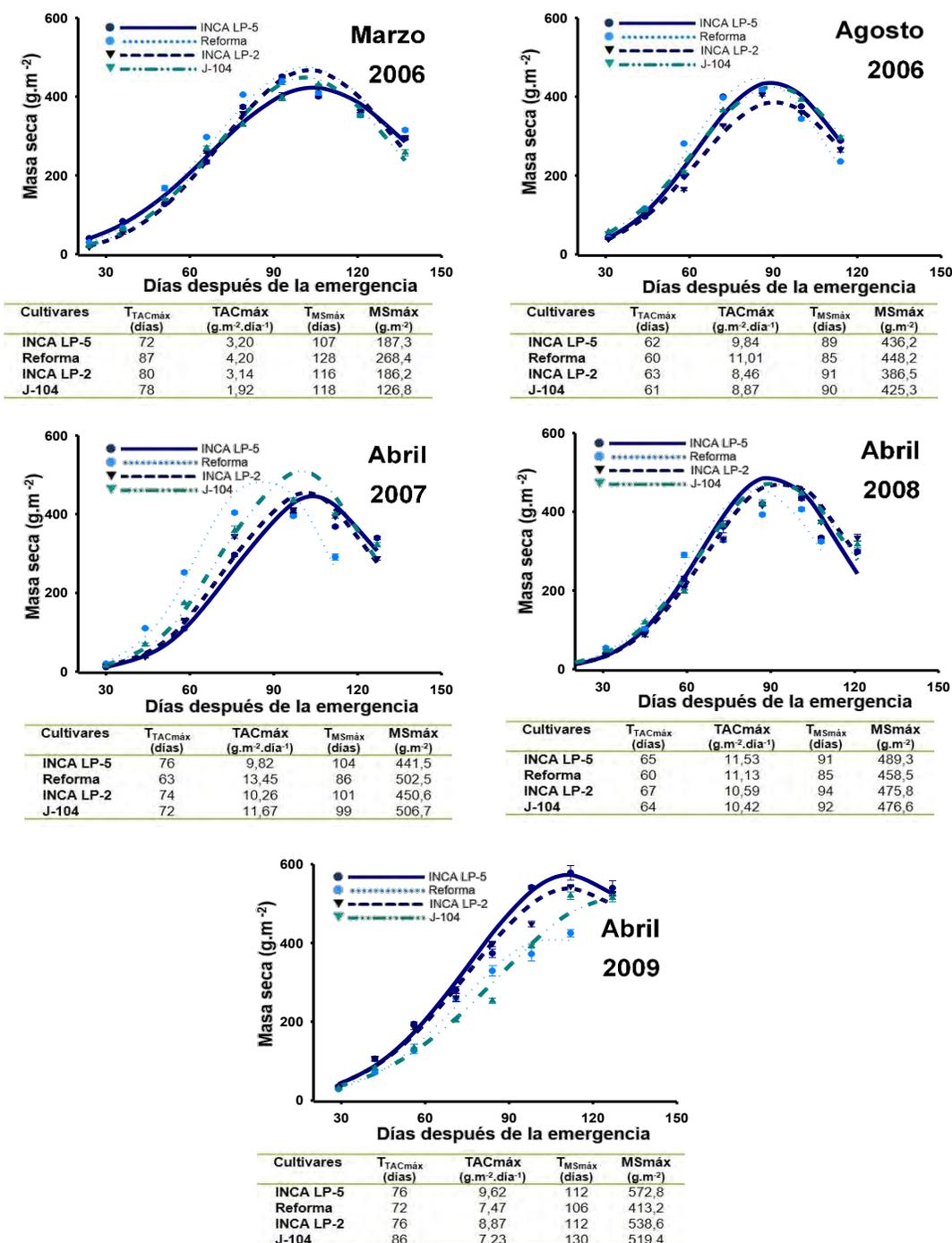


Figura 11. Dinámicas estimadas de la masa seca de tallos ($g.m^{-2}$) de plantas de cultivares de arroz (*Oryza sativa* L.) en diferentes fechas de siembra en la época “lluviosa” y variables derivadas de las mismas. $T_{TACmáx}$: tiempo en el que se alcanza la máxima Tasa Absoluta de Crecimiento; $TACmáx$: valor de la máxima Tasa Absoluta de Crecimiento; $T_{MSmáx}$: tiempo en el que se alcanza el valor máximo de Masa Seca; $MSmáx$: valor máximo de la Masa Seca.