



Estratificación ambiental de arroz por análisis de la interacción genotipo x ambiente con cinco métodos¹

Environmental stratification of rice by genotype x environment interaction analysis using five methods

Marco Acevedo-Barona², Rubén Silva-Díaz², Rosa Álvarez-Parra³, Orlando Torres-Angarita⁴,
Edicta Reyes-Ramones³

- ¹ Recepción: 5 de abril, 2019. Aceptación: 19 de agosto, 2019. Trabajo que formó parte del proyecto de investigación y desarrollo de arroz bajo convenio del Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA) y la Fundación Nacional de Arroz (FUNDARROZ), Venezuela.
- ² Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA), Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias del Estado Aragua. Maracay, Apdo. 2101. Venezuela. macevedo@inia.gob.ve (<https://orcid.org/0000-0002-0841-5329>), rjsilva@inia.gob.ve
- ³ Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA), Centro de Investigaciones Agropecuarias del Estado Portuguesa. Araure, Apdo. 102. Venezuela. ralvarez@inia.gob.ve (<https://orcid.org/0000-0001-9855-4244>), ereyes@inia.gob.ve (<https://orcid.org/0000-0003-0432-9113>).
- ⁴ Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA), Centro de Investigaciones Agropecuarias del Estado Barinas. Barinas, Apdo. 170. Venezuela. otorres@inia.gob.ve (<https://orcid.org/0000-0001-8501-2964>).

Resumen

Introducción. Venezuela posee más de dos millones de hectáreas aptas para el cultivo de arroz, de las cuales se aprovechan alrededor del 25 %, bajo el sistema de producción con riego por inundación con diversas tecnologías de manejo agronómico y ambientes que podrían afectar la expresión fenotípica de los materiales genéticos. **Objetivo.** El objetivo del presente trabajo fue cuantificar la magnitud de la interacción genotipo ambiente (IGA), para estratificar los ambientes de cultivo de arroz bajo riego a través de cinco métodos analíticos y determinar su asociación. **Materiales y métodos.** Se evaluaron ocho genotipos de arroz en doce ambientes resultantes de la combinación de localidades y épocas de siembra en las regiones de los Llanos Centrales y Occidentales de Venezuela, durante los años 2012-2013. La estratificación de ambientes se efectuó con base en cinco métodos: tradicional de Lin (TL), distancia euclidiana (DE), porcentaje simple de la IGA (% PS), correlación de Pearson (r_{xy}) y análisis de factores (AF). Se utilizó el diseño estadístico bloques completos al azar con tres repeticiones en parcelas de 20 m². **Resultados.** El ANOVA detectó IGA significativa, explicando el 35 % de la variación total. Los ambientes favorables para arroz representaron el 33 %. Los métodos utilizados TL, DE, % PS, r_{xy} y AF agruparon los doce ambientes de arroz bajo riego en 10, 5, 8, 10 y 3 grupos, respectivamente; los mismos no fueron eficientes en identificar ambientes diferentes cuando se utilizaron distintas épocas de siembra en una misma localidad. **Conclusiones.** El método análisis de factores fue más eficiente en identificar ambientes homogéneos, complementado con los métodos % PS y TL que presentaron asociación moderada. Los ambientes Bancos de San Pedro y Asoportuguesa resultaron más informativos e indicados para evaluación de genotipos de arroz, lo contrario ocurrió con las localidades Araure, Algodonal y Torunos.

Palabras claves: factores ambientales, adaptación, *Oryza sativa*, análisis multivariado.



Abstract

Introduction. Venezuela has more than two million hectares suitable for rice production, of which about the 25% are exploited, under the production system with flood irrigation with various agronomic management technologies and environments that could affect the phenotypic expression of the genetic materials. **Objective.** The objective of this work was to quantify the magnitude of the environmental genotype interaction (IGA) to stratify the irrigated rice environments through five analytical methods and determine their association. **Materials and methods.** Eight rice genotypes were evaluated in twelve environments resulting from the combination of localities and planting seasons in the regions of the Central and Western Plains of Venezuela, during the years 2012-2013. The stratification of environments was made based on five methods: traditional Lin (TL), Euclidean distance (ED), simple percentage of IGA (% SP), Pearson correlation (r_{xy}), and factor analysis (AF). The randomized complete block statistical design was used with three repetitions in 20 m² plots. **Results.** ANOVA detected significant IGA, explaining 35% of the total variation. Favorable environments for rice represented 33%. The methods used TL, ED, % SP, rxy, and AF grouped the twelve irrigated rice environments into 10, 5, 8, 10, and 3 groups respectively; they were not efficient in identifying different environments when different planting seasons were used in the same locality. **Conclusions.** The factor analysis method was more efficient in identifying homogeneous environments, complemented with % SP and TL methods that presented moderate association. The Bancos of San Pedro and Asoportuguesa environments were more informative and indicated for the evaluation of rice genotypes. The opposite occurred with the Araure, Algodonal, and Torunos localities.

Key words: environmental factors, adaptation, *Oryza sativa*, multivariate analysis.

Introducción

El cultivo del arroz (*Oryza sativa* L.), en Venezuela dispone de 2 425 000 hectáreas aptas, de las cuales 1 091 250 hectáreas (45 %) no presentan limitaciones por inundación, características físicas de suelo y fertilidad (Benacchio y Avilán, 1991). Alrededor de 310 000 hectáreas (28 %) se cosechan anualmente en Venezuela. No obstante, las estadísticas disponibles más recientes muestran un decrecimiento del área cosechada de alrededor de 100 000 hectáreas entre 2009 y 2015 (FEDEAGRO, 2017). Las principales zonas productoras están ubicadas en el estado Guárico (región central) y en los estados Portuguesa, Cojedes y Barinas (región occidental). En ambas regiones el sistema de producción predominante es bajo riego con rendimiento medio de 5,1 t ha⁻¹ para el 2015 (FEDEAGRO, 2017). Existen dos épocas definidas de siembra comercial, una de sequía (noviembre-abril), la más importante con aproximadamente 201 500 hectáreas (65 %), y otra de lluvia (mayo-octubre) con 108 500 hectáreas (35 %).

El arroz se cultiva en las diferentes regiones bajo diversas tecnologías de manejo y ambientes que podrían afectar la expresión del fenotipo de los materiales genéticos; esto ocurre porque la expresión de los genes es influenciada o regulada por el ambiente (Ramalho et al., 2012). Se considera el fenotipo como resultado del genotipo, del ambiente y de la interacción del genotipo por ambiente (IGA). En consecuencia, la IGA interfiere en la recomendación del cultivar por la inconsistencia de su desempeño en los ambientes (localidades y años) y en la estimación de parámetros genéticos.

La presencia de IGA puede verse como un problema para el fitomejorador (Ramalho et al., 2012), sin embargo, puede ser aprovechada al identificar cultivares específicos para cada ambiente, al seleccionar cultivares con mayor estabilidad fenotípica y al realizar una estratificación ambiental o zonificación agroecológica. La estratificación ambiental consiste en agrupar los ambientes ecológicamente similares en subregiones dentro de las cuales la IGA es no significativa. Esta agrupación viene dada por las diferencias macro-ambientales, donde las variaciones

impredecibles (precipitación, temperaturas, humedad relativa, entre otras) no se toman en cuenta; por lo tanto, la estratificación consigue minimizar la varianza de la IGA de la correlación genética de la parte compleja.

En los programas de mejoramiento genético los potenciales cultivares se validan en diversos ambientes (localidades y años), en las principales zonas de producción o de interés del fitomejorador, implicando mayor inversión en tiempo y recursos Acevedo et al. (2010). En consecuencia, la importancia de la estratificación ambiental radica en agrupar ambientes similares con base en la respuesta genotípica, con el fin de disminuir costos y aumentar eficiencia en la selección y recomendación de nuevos cultivares, además de identificar localidades claves para evaluación y caracterización del germoplasma. Un estudio reciente en arroz en Venezuela agrupó los doce ambientes de pruebas en dos grandes mega-ambientes, donde los genotipos 'Soberana FI' y 'SD-20A' mostraron mejores desempeños (genotipos ganadores o vencedores), el estudio también señaló que las localidades de pruebas discriminatorias y representativas fueron Bancos de San Pedro (Guárico) en ambos periodos (seco y lluvioso) y Algodonal (Portuguesa) para el periodo lluvioso (Acevedo et al., 2019).

Existen varios métodos de estratificación ambiental, entre los más utilizados están el tradicional de Lin (1982), donde la formación de subgrupos ambientales similares resulta de la IGA no significativa. Otros donde la IGA es significativa, se requiere identificar entre pares de ambientes, cuánto representa la proporción simple de dicha interacción, si esta es alta ($\% PS \geq 50\%$) sugiere ambientes relacionados y no comprometen el ordenamiento de los genotipos dentro del grupo de ambientes estudiados (Cruz y Castoldi, 1991). Otro método ampliamente utilizado es la correlación de Pearson, donde valores altos y significativos entre pares de ambientes se consideran similares o relacionados y pocos informativos.

Las técnicas multivariadas también han sido utilizadas como método de agrupamiento para clasificar ambientes, caracterizadas por la homogeneidad dentro de los grupos y heterogeneidad entre ellos, según el criterio de similaridad o disimilaridad. El método de análisis de factores igualmente determina la adaptabilidad y la estabilidad ambiental por el principio de similaridad del desempeño de los genotipos de Murakami y Cruz (2004). El modelo AMMI (efectos principales aditivos e interacción multiplicativa), extensamente utilizado, donde los efectos de los genotipos y los ambientes son considerados de tipo aditivos y lineales, permite su estudio por procedimientos de análisis de varianza convencional, mientras que la IGA es de efecto multiplicativo que puede ser explicado a través del análisis de componentes principales (Bernardo, 2002). El modelo propuesto por Yan et al. (2002) agrupa tanto al genotipo como a la IGA de efecto multiplicativo, a través del modelo SREG (regresión de sitios) y utiliza el análisis de componentes principales.

El objetivo del presente trabajo fue cuantificar la magnitud de la interacción genotipo ambiente (IGA), para estratificar los ambientes de cultivo del arroz bajo riego a través de cinco métodos analíticos y determinar su asociación.

Materiales y métodos

Los datos analizados provinieron de los Ensayos de Validación Agronómica de Cultivares (EVAC), coordinados por la Comisión Nacional de Semilla (CONASEM) y conducidos en las principales regiones de producción de arroz en Venezuela. En el Cuadro 1 se presentan las principales características agroecológicas de las localidades.

Se evaluaron ocho genotipos de arroz bajo riego (Cuadro 2), cinco corresponden a líneas en validación y tres testigos comerciales de diferentes instituciones y empresas de investigación en el cultivo en Venezuela.

Los doce ambientes considerados resultaron de la combinación de localidades, épocas de siembra y años (Cuadro 3).

El diseño utilizado fue bloques completos al azar con tres repeticiones, cada unidad experimental medía 20 m² y el área cosechada fue de 12 m², excluido el efecto de bordura. El manejo agronómico de los ensayos fue similar al comercial en cada localidad, bajo riego en el periodo seco y riego complementario durante el periodo de lluvia. Se

Cuadro 1. Principales características agroclimáticas de las localidades para el estudio de la estratificación ambiental de arroz en Venezuela, años 2012-2013.

Table 1. Main agroclimatic characteristics of the localities for the environmental stratification of rice study in Venezuela, years 2012-2013.

Localidades	Estado	Ubicación geográfica		Altitud m	Precipitación (media) mm	Temperatura (media) °C
		N	W			
Bancos de San Pedro	Guárico	08°44'	67°32'	72	1242,6	27,5
Araure	Portuguesa	09°36'	69°14'	200	1523,3	28,4
Algodonal	Portuguesa	09°37'	69°09'	190	1652,0	29,1
Asoportuguesa	Portuguesa	09°26'	69°08'	198	1396,1	27,5
Torunos	Barinas	08°33'	70°08'	185	1698,5	26,5

Fuente: INIA s.f. / Source: INIA s.f.

Cuadro 2. Genotipos y procedencia de los materiales de arroz considerandos para el estudio de estratificación de ambientes en Venezuela. 2012-2013.

Table 2. Genotypes and origin of rice materials considered for environmental stratification study in Venezuela. 2012-2013.

Nº	Genotipo	Procedencia
1	PN04I051	Instituto nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA)
2	PN09I051	Instituto nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA)
3	AP06B041	Asociación de Productores de Semilla Certificada de los Llanos Occidentales (Aproscello)
4	ASP10	Asociación de Productores de Portuguesa (Asoportuguesa)
5	ASP09	Asociación de Productores de Portuguesa (Asoportuguesa)
6	Soberana FL	Instituto nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA)
7	Venezuela 21	Instituto nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA)
8	SD-20A	Fundación Desarrollo Agrícola Naranjal Asociación Civil (Danac)

Cuadro 3. Ambientes de evaluación de ocho genotipos de arroz bajo riego para estudio de estratificación ambiental en Venezuela, años 2012-2013.

Table 3. Evaluation environments of eight rice genotypes under irrigation for environmental stratification study in Venezuela, years 2012 - 2013.

Localidades	Año		
	2012	2013	2013
	Periodo seco	Periodo seco	Periodo lluvia
Bancos de San Pedro	1*	5	10
Torunos	2	6	
Araure		7	11
Algodonal Sehiveca	3	8	12
Asoportuguesa	4	9	

* Corresponde a la identificación de los ambientes en el texto / * Corresponds to environments identification in the text.

utilizó semilla pre-germinada al voleo en densidad promedio de 0,1 t ha⁻¹. La variable analizada fue el rendimiento en granos paddy expresado en toneladas por hectárea (t ha⁻¹), ajustado al 12 % de humedad.

Análisis estadísticos

Se realizaron análisis de varianza por ambiente luego de probados los supuestos. La homocedasticidad de los errores se verificó por la prueba del F máximo de Hartley, según Pimentel-Gomes (2000), cuando la relación entre los cuadrados medios de error resulta menor de 7, se considera no significativa y fue posible hacer el análisis combinado entre ambientes, utilizando el modelo PROC GLM del programa SAS versión 8.1 (SAS Intitute Inc., 2002), considerando genotipos y ambientes como efectos fijos, según el modelo lineal aditivo:

$$Y_{ijk} = \mu + g_i + \beta_{(k)j} + a_j + (ga)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

donde, Y_{ijk} es el valor fenotípico del genotipo i ($i = 1 \dots 8$), evaluado en k repeticiones ($k = 1, \dots, 3$) y j ambientes ($j = 1, \dots, 12$); mientras μ , g_i , a_j , $(ga)_{ij}$, representan la media general, efecto de genotipos, de ambientes e IGA, respectivamente; $\beta_{(k)j}$ es el efecto de repetición dentro de ambiente; y ε_{ijk} el error experimental asociado a la ijk -ésima observación.

La descomposición del valor fenotípico (Y_{ijk}) permite cuantificar la magnitud de la IGA. Una vez detectada y cuantificada la IGA, se determinó el índice ambiental, calculado como el desvío del promedio de todos los genotipos de un determinado ambiente ($Y_{i..}$) en relación con el promedio de los genotipos en todos los ambientes (media general) ($Y_{...}$), el mismo supone que el ambiente es favorable cuando es positivo y mayor a cero, y desfavorable cuando es negativo (Eberhart y Russell, 1966). Posteriormente, se realizó el estudio de estratificación ambiental con cinco metodologías.

El primer método correspondió al Tradicional de Lin (TL) (1982), el mismo estima la suma de cuadrados de la IGA entre genotipos, inicialmente entre pares de ambientes, agrupándolos como similares cuando la misma resulta no significativa por la prueba F, luego con tres ambientes y así sucesivamente, realizando el mismo procedimiento de suma de cuadrados con el fin de evaluar la formación de nuevos grupos, siempre agrupando ambientes cuya interacción es no significativa. La suma de cuadrados de la interacción entre un par de ambientes está dada por la ecuación: $ScGA_{jj'} = \beta_{jj'} = \frac{1}{2} \left[d_{jj'}^2 - \frac{1}{g} (Y_{.j} - Y_{.j'})^2 \right]^2$ donde $d_{jj'}^2 = \sum (Y_{ij} - Y_{ij'})^2$ y para más de dos ambientes $\beta_{jj'xl} = \frac{2}{n} (S_{jj'x} + \beta_{jx} + \beta_{j'l} + \beta_{xl})$ en que $S_{jj'x}$ representa la suma de cuadrados de la IGA y de las combinaciones dos a dos de los ambientes.

El segundo método utilizado fue la distancia euclidiana media (DE), según la ecuación $\bar{d}_{jj'} = \frac{1}{\sqrt{n}} d_{jj'}$, donde n está referido al número de variables estudiadas (ambientes) y $\bar{d}_{jj'}$ la distancia media entre el ambiente j y j' , esta medida de disimilaridad utiliza las medias genotípicas entre los ambientes. Posteriormente, a partir de estos valores estimados de distancia, se empleó el método de agrupamiento jerárquico UPGMA (Unweighted Pair Group Method using Arithmetic averages) (promedio) y el ajuste por el coeficiente de correlación cofenética propuesto por Rohlf y Sokal (1981). El mismo permite determinar la asociación entre el dendograma y la matriz de distancia original, importa que sea lo más alta posible, siempre menor o igual a 1.

El tercer método fue la proporción simple de la interacción (% PS), la cual separa la IGA entre pares de ambientes la proporción simple debida a la variabilidad de las medias genotípicas entre ambientes, a través de la ecuación $\%SGA_{jj'} = \frac{100 \times c}{CMGA_{jj'}}$, donde $c = \sqrt{(1-r)^3 CM_j CM_{j'}}$, donde r es la correlación entre las medias de los genotipos en los ambientes j y j' y CM son los cuadrados medios entre genotipos de esos ambientes. La presencia de alta % PS (superior al 50%), sugiere ambientes relacionados que no comprometen el ordenamiento de los genotipos (Cruz y Castoldi, 1991).

El cuarto método utilizado correspondió a la correlación de Pearson (CP), estimada a partir de las medias de genotipos entre pares de ambientes, considerándolos relacionados o similares cuando sus magnitudes son altas y significativas; definido por la covarianza entre pares de ambientes y las desviaciones estándar de cada ambiente, según la siguiente la expresión, $r_{jj'} = \frac{Cov_{jj'}}{\sqrt{V_j V_{j'}}$.

El quinto método adoptado fue el análisis de factores (AF), mismo que supone que cada variable (dada por los ambientes) puede ser expresada como una combinación lineal de factores, donde la carga factorial está determinada por la correlación entre el factor y la variable; se calcula la comunidad como medida de eficiencia de representación de los ambientes con el factor (Murakami y Cruz, 2004). El número de factores finales en la estratificación ambiental puede estar dado por los autovalores iguales o superiores a 1,00; cuando la proporción explicada por estos es baja, se considera un mayor número de factores hasta alcanzar por lo menos 80 % de la variabilidad total (Cruz y Carneiro, 2006). La agrupación de los ambientes vendrá dada por la carga factorial final, calculada después de la rotación, valores superiores o iguales de 0,70 y de igual signo indican alta correlación entre ambientes y pueden ser agrupados; sin embargo, cargas factoriales con valores menores o iguales 0,50 no deben pertenecer al grupo y valores entre 0,50 - 0,70 no garantizan ningún agrupamiento (Cruz y Carneiro, 2006).

Los análisis para la estratificación ambiental de arroz bajo ecosistemas con riego en Venezuela se realizaron utilizando el programa estadístico GENES (Aplicativo Computacional en Genética y Estadística) (Cruz, 2006).

La asociación entre los métodos de estratificación ambiental se determinó por la correlación de Spearman (r_s) y la intensidad o grado de asociación estuvo determinada de muy baja (0,00-0,25), baja (0,26-0,50), moderada (0,51-0,75), fuerte (0,76-0,90) y muy fuerte (0,91-1,00) (Finney, 1980).

Resultados

Los análisis de la varianza del rendimiento de granos detectaron diferencias significativas ($p \leq 0,05$ y $p \leq 0,01$) para genotipos en todos los ambientes (Cuadro 4), excepto en el ambiente 1 (Bancos de San Pedro periodo seco

Cuadro 4. Ambientes, período de evaluación y rendimiento promedio ($t\ ha^{-1}$) de los ensayos de arroz en Venezuela. 2012-2013.

Table 4. Environments, evaluation period, average yield ($t\ ha^{-1}$) of rice trials in Venezuela. 2012-2013.

N°	Ambiente	Estado	Periodo	Rend.	Cuadrados medios		CV%
					Genotipo	Error Exp.	
1	Bcos de San Pedro	Guárico	Seco 2012	6,21	0,74	0,43	10,58
2	Torunos	Barinas		6,16	3,15*	0,62	12,76
3	Algodonal	Portuguesa		6,22	3,33**	0,60	12,44
4	Asoportuguesa	Portuguesa		6,34	2,36**	0,30	8,59
5	Bcos de San Pedro	Guárico	Seco 2013	7,29	1,54**	0,23	6,55
6	Torunos	Barinas		6,57	0,99*	0,43	9,95
7	Araure	Portuguesa		5,85	3,20*	0,62	13,44
8	Algodonal	Portuguesa		5,68	2,31*	0,48	12,15
9	Asoportuguesa	Portuguesa		7,98	0,88*	0,29	6,76
10	Bcos de San Pedro	Guárico	Lluvia 2013	6,04	2,06**	0,30	9,07
11	Araure	Portuguesa		5,46	1,64*	0,36	11,03
12	Algodonal	Portuguesa		5,06	2,57**	0,34	11,43
			Media	6,24			10,33

Rend, Error Exp y CV%: rendimiento, error experimental y coeficiente de variación, respectivamente / Rend, Error Exp. and CV%: yield, experimental error, and coefficient of variation, respectively.

* y ** significativo al 5 y 1 %, respectivamente por la prueba de F / *, ** significantly by F test to 5 and 1 %, respectively.

2012). El promedio general del rendimiento fue de 6,24 t ha⁻¹, variando entre 5,06 - 7,98 t ha⁻¹ para los ambientes 12 (Algodonal-Portuguesa lluvia 2013) y 9 (Asoportuguesa-Portuguesa seco 2013), respectivamente. En los ambientes 1, 5 y 10 (Bancos de San Pedro, Guárico) destacó el desempeño medio de los genotipos.

El coeficiente de variación (CV%) utilizado como medida de precisión experimental resultó adecuado para el carácter rendimiento en cultivos autógamos, variando entre 6,55 - 13,44 % en los ambientes 5 y 7, respectivamente. La prueba de homogeneidad de los errores por la prueba de F de Hartley, según Pimentel-Gomes (2000) fue de 2,70^{NS}. El análisis de varianza combinado entre ambientes detectó diferencias significativas ($p \leq 0,05$) para todas las fuentes de variación. La fuente ambiente presentó mayor magnitud y variación (54 %) con respecto a la varianza total, seguida de la interacción genotipo por ambiente con 35 % y genotipo con 11 %.

El índice ambiental varió entre -1,18 y 1,74, correspondiendo a los ambientes 12 y 9, respectivamente (Cuadro 5). Los ambientes favorables (4, 5, 6 y 9) representaron el 33 % para el cultivo del arroz con riego, mientras el 67 % fueron desfavorables, sobresaliendo con mayores índices los ambientes 12, 11, 8 y 7, que corresponden a las localidades Algodonal y Araure en el estado Portuguesa, periodo de lluvias y seco 2013, respectivamente.

Cuadro 5. Índice ambiental para ambientes de cultivo de arroz con riego en Venezuela. 2012-2013.

Table 5. Environmental index for rice under irrigation growing environments in Venezuela.2012-2013.

N°	Ambientes	Estado	Índice ambiental
1	Bcos de San Pedro	Guárico	-0,03
2	Torunos	Barinas	-0,08
3	Algodonal	Portuguesa	-0,02
4	Asoportuguesa	Portuguesa	+0,10
5	Bcos de San Pedro	Guárico	+1,05
6	Torunos	Barinas	+0,33
7	Araure	Portuguesa	<u>-0,39</u>
8	Algodonal	Portuguesa	<u>-0,56</u>
9	Asoportuguesa	Portuguesa	+1,74
10	Bcos de San Pedro	Guárico	-0,20
11	Araure	Portuguesa	<u>-0,78</u>
12	Algodonal	Portuguesa	<u>-1,18</u>

+ y -: refiere a ambientes favorables y desfavorables, respectivamente / + and -: refers to favorable and unfavorable environments, respectively.

El estudio de estratificación ambiental en el cultivo de arroz bajo riego en Venezuela estuvo basado en el principio de la existencia de variación agroclimática en las regiones productoras con diversas prácticas de manejo entre ellas, que afectan el desempeño medio de los genotipos. Entonces, la estratificación estuvo fundamentada en agrupar esos ambientes en grupos homogéneos donde las respuestas genotípicas fueron similares o poco afectadas por el ambiente.

Análisis de la interacción genotipo por ambiente (IGA)

Método Tradicional de Lin (TL) (1982)

El análisis de estratificación por el método de Lin (1982), formó diez grupos de ambientes donde la IGA no presentó diferencias estadísticas, dentro de las 66 combinaciones pares posibles (Cuadro 6). El grupo I concentró seis ambientes (6, 7, 8, 10, 11, 12), con comportamiento homogéneos el resto de los grupos aglutinó solo pares de ambientes. Los ambientes 1 y 4 exhibieron IGA significativas y no formaron grupos; seguidos de los ambientes 3 y 9, que formaron grupos homogéneos solo con los ambientes 5, 6, 7 y 12, respectivamente. El resto de los ambientes resultaron homogéneos con más de dos ambientes.

Cuadro 6. Agrupamiento de ambientes de arroz bajo riego por los métodos tradicional de Lin, Distancia Euclidiana promedio (disimilaridad), proporción simple de la interacción y correlación de Pearson y Análisis de factores. Venezuela. 2012-2013.

Table 6. Grouping of rice environments under irrigation by Lin traditional methods, average Euclidean distance (dissimilarity), simple proportion of interaction, and Pearson correlation and factor analysis methods. Venezuela. 2012-2013.

Grupos	Tradicional de Lin	Distancia Euclidiana promedio	Proporción simple interacción	Correlación Pearson	Análisis de Factores
I	6,7,8,10,11,12	1,2,3,4,6,11	2,6,8,11	1,2	2,6,7,8,10,11,12
II	9,12	7,9,10	2,6,8,10,11,12	1,2,4,6,8,11	1
III	7,9	12	7,8,9	2,4	3
IV	2,8	5	2,6,7,8,11	2,6,8,10,11,12	
V	3,5	8	7,9,12	7,8,9,11,12	
VI	2,6		6,10,11	2,6,7,8,9,10,11,12	
VII	2,11		2,6,8,10,11	7,8,9,10,11,12	
VIII	3,6		6,12	6,8,10,11,12	
IX	5,6			2,6,7,8,9,10,11,12	
X	5,8			6,7,8,9,10,11,12	

Método de la Distancia Euclidiana (DE) promedio

La medida de disimilaridad con base en la distancia euclidiana promedio y el empleo del método jerárquico UPGMA, se muestra en la Figura 1. En el dendrograma se consideró la línea de corte con la distancia euclidiana media ($DE = 0,51$), agrupando los doce ambientes en cinco grandes grupos (Cuadro 6 y Figura 1), con una correlación cofenética igual 0,84.

El primer grupo concentró el mayor número de ambientes con seis, donde los ambientes 2 y 3 presentaron mayor asociación (menor distancia), seguidos de los ambientes 4, 1, 11 y, por último el 6. El grupo II estuvo formado por los ambientes 7, 9 y 10, y los dos primeros fueron menos disímiles. Los últimos tres grupos estuvieron formados por un solo ambiente cada uno, 12, 5 y 8, y mostraron las mayores diferencias con el resto de los grupos.

Descomposición de la proporción simple de la interacción genotipo por ambiente (% PS) y Correlación de Pearson (r_{xy})

Los valores correspondientes a la proporción de la IGA en su parte simple (% PS), por las metodologías de Cruz y Castoldi (1991) y la correlación de Pearson (r_{xy}), formaron 8 y 10 grupos (Cuadro 6), respectivamente. La

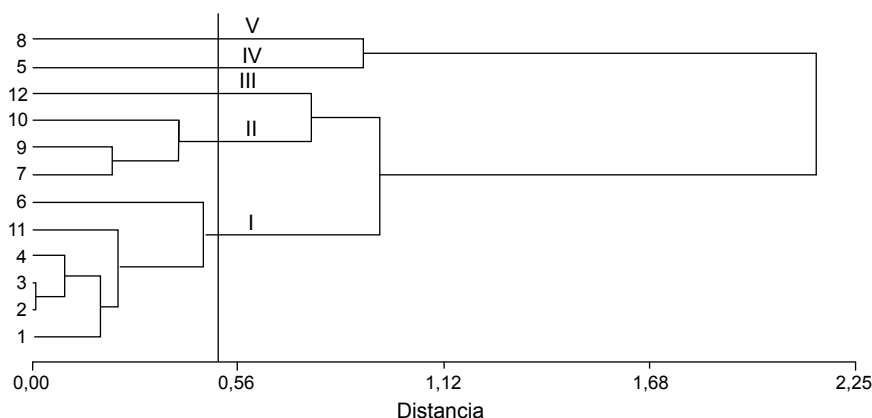


Figura 1. Dendrograma de distancia euclidiana promedio para ambientes de arroz de riego en Venezuela, años 2012-2013.

Figure 1. Average of Euclidean distance dendrogram for irrigated rice environments in Venezuela, 2012-2013.

mayor % PS ≥ 50 fue detectada en los ambientes 2, 6, 8 y 11, lo cual permitió agrupar mayor número de ambientes homogéneos y pocos informativos. Seguidos por los ambientes 7, 9, 10, y 12, que presentaron agrupamientos con ciertas combinaciones, mientras que los ambientes 1, 3, 4 y 5 exhibieron % PS ≤ 50 y, en consecuencia fueron considerados ambientes diferentes.

El método de correlación de Pearson (r_{xy}) formó mayor cantidad de grupos homogéneos con mayor número de ambientes (Cuadro 6), destacando los ambientes 2, 6, 7, 8, 9, 10, 11 y 12 con correlación alta y significativa en mayor número de ambientes, superior al método % PS, y se considera, por consiguiente, más sensible a este último método para agrupar ambientes de arroz en Venezuela. Los ambientes 3 y 5 no mostraron asociación significativa y fueron considerados ambientes diferentes, resultados que coinciden en 50 % con el método % PS. Los ambientes 1 y 4 formaron grupos con el ambiente 2, de manera positiva y negativa, respectivamente.

Análisis multivariado de factores (AF)

El AF para la estratificación de ambientes de arroz mostró que el análisis de la carga factorial final, después de la rotación, agrupó los doce ambientes en tres grupos (Cuadro 6 y 7), el factor 1 agrupó siete ambientes (2, 6, 7, 8, 10, 11 y 12), el factor 2 solo al ambiente 1 y el factor 3 solo al ambiente 3. No obstante, los ambientes 4, 5 y 9 no formaron grupo con los otros ambientes, estos resultados coincidieron 50 % con los obtenidos por el método % PS y 50 % $r_{(xy)}$. Los tres primeros autovalores explicaron el 82,03 % de la varianza total. Las comunidades mostraron valores superiores a 70 %, excepto para los ambientes 4 y 5 por el método de Murakami y Cruz (2004).

El grado de asociación entre los métodos de análisis de la IGA para la estratificación de los ambientes de arroz por la correlación de Spearman $r_{(s)}$ se presenta en el Cuadro 8. El coeficiente de $r_{(s)}$ varió en intensidad desde muy baja (-0,03) para el método DE con todos los demás y fuerte (0,80) entre la combinación de los métodos $r_{(xy)}$ con % PS y AF, mientras % PS x AF y TL x $r_{(xy)}$ mostraron correlaciones moderadas significativas ($p \leq 0,05$), variando entre 0,51 y 0,64.

El método DE no presentó asociación alguna con los otros métodos, mostrando muy bajas magnitudes de correlación, no significativas, según el criterio establecido por Finney (1980).

Cuadro 7. Estratificación ambiental por el análisis de factores para arroz bajo riego en Venezuela, 2012-2013.

Table 7. Environmental stratification by the analysis of factors for irrigated rice in Venezuela, 2012-2013.

Nº	Ambiente	Autovalores		Cargas factoriales			Comunidad
		Raíz	% Acum.	Factor 1	Factor 2	Factor 3	
1	Bcos de Sn Pedro	5,93	49,41	0,14	0,87	-0,18	0,81
2	Torunos	2,43	69,65	0,78	0,53	0,29	0,97
3	Algodonal	1,49	82,03	0,12	-0,03	0,95	0,92
4	Asoportuguesa	1,34	93,19	-0,33	-0,67	-0,20	0,61
5	Bcos de Sn Pedro	0,82	99,99	0,23	-0,61	-0,00	0,43
6	Torunos	0,00	100,00	0,95	0,08	0,10	0,91
7	Araure	0,00	100,00	0,73	0,18	-0,52	0,85
8	Algodonal	0,00	100,00	0,92	0,18	-0,13	0,90
9	Asoportuguesa	0,00	100,00	0,65	-0,37	-0,62	0,94
10	Bcos de Sn Pedro	0,00	100,00	0,85	-0,11	-0,05	0,74
11	Araure	0,00	100,00	0,92	0,12	-0,16	0,89
12	Algodonal	0,00	100,00	0,80	0,44	-0,14	0,87

Cuadro 8. Estimado del coeficiente de correlación de Spearman (r_s) entre los métodos utilizados para estratificación ambiental en arroz en Venezuela, 2012-2013.

Table 8. Estimation of the Spearman correlation coefficient (r_s) between the methods used for environmental stratification of rice in Venezuela, 2012 - 2013.

Métodos	$r_{(s)}$	Intensidad
TL x DE	0,13	Muy baja
DE x %PS	0,17	Muy baja
DE x $r_{(xy)}$	0,10	Muy baja
DE x AF	-0,03	Muy baja
TL x AF	0,49 ⁺	baja
TL x $r_{(xy)}$	0,51 [*]	Moderada
%PS x AF	0,64 [*]	Moderada
TL x %PS	0,76 ^{**}	Fuerte
%PS x $r_{(xy)}$	0,80 ^{**}	Fuerte
$r_{(xy)}$ x AF	0,80 ^{**}	Fuerte

^{**}, ^{*}, y ⁺: significativo al 1, 5% y 10%, respectivamente por la prueba t / ^{**}, ^{*} and ⁺ significantly by t test to 1, 5 % and 10 %, respectively.

Discusión

Los análisis de varianzas por ambiente detectaron alta variabilidad genética entre genotipos de arroz, probablemente debido a la variación *per-se* de los materiales y a la alta diversidad ambiental. Al analizar las medias

por ambiente se observó que variaron entre 5,06 - 7,98 t ha⁻¹ para los ambientes 12 y 9, respectivamente. La media general fue 6,24 t ha⁻¹. Si se comparan los resultados obtenidos en este estudio con el promedio nacional de 5,10 t ha⁻¹ (FEDEAGRO, 2017), se aprecia la superioridad de los estimados encontrados.

El coeficiente de variación expresado en porcentaje (% CV) está asociado a la precisión experimental, Pimentel-Gomes (2000) considera valores inferiores al 10 % como bajos y entre 10-20 como medios, aquí los estimados estuvieron en torno al 10 %, lo cual refleja la buena precisión de los experimentos, sin tomar en cuenta el carácter considerado (rendimiento de granos) cuantitativo, el cual tiene efecto de muchos genes y está altamente influenciado por el ambiente.

El análisis de varianza conjunto detectó diferencias significativas en la IGA, lo que indica el efecto directo del ambiente sobre los genes que determinan el rendimiento de granos en el cultivo del arroz, esta interacción puede ser de tipo simple cuando existe desigualdad de la variancia de los genotipos de un ambiente para otro o compleja cuando no hay correlación entre la respuesta genotípica y los ambientes (Murakami y Cruz, 2004). Sin embargo, es válido hacer énfasis en el análisis de la variación total expresada como proporción de los efectos de genotipo, ambiente e IGA con base a la suma de cuadrados totales, efectos que estimaron 11, 54 y 35 % de la variación, respectivamente, resaltando la importancia de los factores ambientales sobre los genéticos.

Los ambientes 4, 5, 6 y 9 resultaron favorables (índice ambiental positivo) para la evaluación y validación de genotipos de arroz bajo riego, correspondiendo respectivamente a Bancos de San Pedro (estado Guárico), Asoportuguesa año 2012 y 2013 (estado Portuguesa) y Torunos (estado Barinas), todos para el periodo seco. Localidades que podrían ser consideradas de buena adaptabilidad general de genotipos de arroz. Estos resultados coinciden parcialmente con lo indicado por Acevedo et al. (2010; 2019), quienes señalaron a las localidades Asoportuguesa (Portuguesa) y Bancos de San Pedro (Guárico) representativas para discriminar genotipos de arroz, no así para la localidad de Toruno (Barinas).

Los ambientes Araure y Algodonal en ambos periodos fueron considerados desfavorables (índice ambiental negativo) para el cultivo de arroz bajo riego, resultado que coincide en parte con el reportado por Acevedo et al. (2010; 2019), quienes señalaron a la localidad Araure como poca representativa y diferenciadora para prueba con genotipos de arroz en ambas época de siembra, posiblemente atribuido al manejo del cultivo más que a las condiciones propias de los ambientes. No obstante, al analizar la IGA con el modelo biplot GGE en arroz bajo riego en Venezuela y se concluyó que las localidades Bancos de San Pedro (Guárico) y Algodonal (Portuguesa) fueron discriminatorias y representativas; mientras Asoportuguesa (Portuguesa) fue identificada como intermedia para ambos aspectos y Torunos (Barinas) como no diferenciadora ni representativa para pruebas de arroz (Acevedo et al., 2019).

El método tradicional de Lin (1982), para estratificación ambiental, es considerado de fácil aplicación e interpretación. Los doce ambientes de arroz formaron diez grupos, donde la IGA resultó no significativa. El grupo I constituido por los ambientes 6, 7, 8, 10, 11 y 12, reunió tres ambientes del periodo seco 2013 y los tres últimos del periodo de lluvia 2013; ambientes ubicados geográficamente en zonas agroclimáticas distintas, pero con diferentes épocas de siembra y manejo agronómico diferenciado. Por el contrario, los ambientes 3 y 9 que corresponden respectivamente a Algodonal seco 2012 y Asoportuguesa seco 2013, ambos del estado Portuguesa, ubicados en áreas geográficas similares, se comportaron de manera diferente, posiblemente atribuido a épocas de siembra diferentes y al manejo agronómico diferenciado entre esos ambientes.

Los ambientes 1 y 4, que corresponden a Bancos de San Pedro (Guárico) y Asoportuguesa (Portuguesa), para el periodo seco 2012, no formaron grupos con otros ambientes; ambos se encuentran en zonas de producción diferentes, económicamente importantes y estratégicas del país, por tal motivo, deben ser considerados para el establecimiento de ensayos en etapa final de validación de cultivares de arroz bajo riego. Ambas localidades fueron identificadas como discriminatorias y representativas para evaluación de genotipos de arroz, con base en el análisis biplot GGE (Acevedo et al., 2019). El método de Lin, es señalado como el más eficiente para identificar ambientes

pocos informativos; situación importante, ya que permitiría circunscribir la selección de genotipos altamente productivos a pocos ambientes y, en consecuencia al mejor uso del recurso económico (Pereira et al., 2010).

Entre los métodos multivariados empleados está el análisis de agrupamiento de ambientes utilizando como medida de disimilaridad, la distancia euclidiana promedio y el método de agrupamiento jerárquico UPGMA (Figura 1), en el mismo se obtuvo un coeficiente de correlación cofenético de 0,84, lo que indica alta correspondencia entre la matriz de distancia original y el dendrograma con la distancia euclidiana promedio. No obstante, el agrupamiento de los ambientes no necesariamente obedece al orden y utilidad agronómica desde el punto de vista práctico; es decir, los ambientes parecieran ser agrupados de acuerdo con el algoritmo propio del método más que al comportamiento promedio de los genotipos. Esto no permitió encontrar concordancias con otros métodos de estratificación ambiental en este estudio.

Al utilizar como línea de corte la distancia euclidiana media de 0,51 se formaron cinco grupos. Los grupos I y II fueron los que reunieron mayor número de ambientes; el primero de ellos con seis, de los cuales los cuatro primeros pertenecientes a la época seca 2012 y los dos últimos, 6 y 11, al periodo seco 2013 y periodo de lluvia 2013, respectivamente. Esos ambientes son considerados similares y homogéneos, aún cuando están ubicados en distintas regiones geográficas con época de siembra y manejo agronómico diferentes, esto afirma la presunción del método de agrupar los ambientes de acuerdo con el algoritmo propio al desempeño medio de los genotipos. El grupo II reunió a los ambientes 7, 9 y 10 que por el método de Lin resultaron diferentes con el ambiente 7, poco favorable para arroz bajo riego, mientras que 9 y 10 fueron más representativos y discriminatorios para genotipos arroz. Las mayores distancias fueron encontradas entre los ambientes 12, 5 y 8, no obstante 8 y 12 son las mismas localidades, pero en épocas de siembra diferentes. Estos resultados tuvieron poca coincidencia con los demás métodos, corroborado por el bajo grado de asociación.

Los métodos proporción simple de la interacción de Cruz y Castoldi (1991) y la correlación de Pearson presentaron alta coincidencia en la formación de grupos de ambientes homogéneos. El comportamiento diferencial de los genotipos debido a la desigualdad de las varianzas en la respuesta del cultivar de un ambiente para otro, está dado por la IGA de tipo simple ($\% PS \geq 50$), sin afectar el ordenamiento de los genotipos principalmente en los ambientes 2, 6, 7, 8 y 11, correspondientes a Torunos seco 2012, Torunos seco 2013 (ambos de Barinas), Araure seco 2013, Algodonal seco 2013 y Araure lluvia 2013 (Portuguesa). Este resultado coincide con lo expresado por Acevedo et al. (2010), quienes señalaron a las localidades de Torunos, Araure y Algodonal con rendimiento de granos inferior a la media general, no representativo para discriminar genotipos de arroz y contribución diferenciada a la IGA.

Los ambientes 1, 3, 4 y 5 que corresponden a Bancos de San Pedro, Algodonal y Asoportuguesa periodo seco 2012 y 2013 presentaron $\% PS \leq 50$, el comportamiento diferencial de los genotipos, no permite un ordenamiento único de los genotipos por ambiente, dificultando la selección y recomendación de cultivares, y deben verse como ambientes que contribuyen de manera diferente a la IGA, no homogéneos.

Los resultados antes señalados presentaron alta similaridad con los mostrados por el método de correlación $r_{(xy)}$ con alto grado de asociación entre ambos métodos. Son ambientes poco relacionados, diferenciados geográficamente con prácticas de manejo agronómico variadas que afectan el comportamiento de los cultivares. En este sentido, los ambientes 2, 6, 7, 8, 9, 10, 11 y 12 presentaron correlaciones en su mayoría de altas magnitudes, significativas, variando entre 0,59 a 0,96, resultados que demuestran la alta asociación entre la mayoría de combinaciones de esos ambientes y los encontrados con $\% PS \geq 50$.

El AF concentró en los primeros tres autovalores más del 80 % de la variabilidad total y definió el número de factores en tres para la obtención de las cargas factoriales después de la rotación. Cada factor agrupó ambientes altamente correlacionados y poco correlacionados con los ambientes agrupados por otros factores (Cruz y Carneiro, 2006). Las comunidades en su mayoría se ubicaron por encima de 0,80, indicando la eficiencia del proceso de factorización en la porción común de las variables ambientes.

El primer factor agrupó siete ambientes (2, 6, 7, 8, 10, 11 y 12), coincidiendo con los métodos de correlación de Pearson y % PS, demostrando resultados consistentemente similares por los tres métodos entre las localidades durante los dos años. Aceptando que los ambientes 2 y 6 corresponden a Torunos (estado Barinas) en época seca, en distintos años; 7-8 y 11-12 pertenecen a los ambientes Araure y Algodonal (estado Portuguesa) para los periodos seco y lluvia 2013, respectivamente. Este agrupamiento indica de manera general que el desempeño del rendimiento de los cultivares fue similar a través de los ambientes, sin variación en el ordenamiento. El segundo factor agrupó al ambiente 1 (Bancos de San Pedro seco 2012) que no mostró asociación con otros ambientes y donde prevaleció la IGA (% PS \leq 50), resultados que coinciden en 100, 90 y 100 % con los obtenidos por los métodos % PS, $r_{(xy)}$ y TL, respectivamente. El tercer factor agrupó solo al ambiente 3 (Algodonal seco 2013) al que se le atribuye análisis similar al anterior, evidenciando una coincidencia de 100, 100 y 80 % con los métodos % PS, $r_{(xy)}$, y TL, respectivamente. Resultados similares reportaron Acevedo et al. (2019), quienes indicaron ambas localidades como discriminatorias y representativas para pruebas de arroz, diferenciándolas del resto de los ambientes considerados en ambos ciclos.

Los ambientes 4 (Asoportuguesa periodo seco 2012), 5 (Bancos de San Pedro periodo seco 2013) y 9 (Asoportuguesa periodo seco 2013), no formaron grupos por presentar una carga factorial menores de 0,70 y de signo negativo, lo cual no garantiza el agrupamiento en sus respectivos factores. Además, ambientes con carga factorial de signo negativo, indican que su agrupamiento es contrario al ambiente con carga factorial positiva. En consecuencia, deben ser considerados ambientes diferentes.

Los ambientes 4 y 5 tampoco formaron grupos con los métodos % PS y $r_{(xy)}$; en ambos prevalece la interacción de tipo compleja con baja asociación, que podría atribuirse a las características agroclimáticamente contrastantes de los ambientes y a los diferentes niveles tecnológicos de manejo. El ambiente 9 presentó diferencias por los métodos % PS y $r_{(xy)}$, formando grupo con los ambientes 7 y 12 y 7, 8, 11, respectivamente, explicado por su proximidad geográfica y las condiciones similares (agro-climáticas y de manejo) en el estado Portuguesa.

En general, se comprobó que el método análisis de factores fue más eficiente en identificar ambientes homogéneos, comparado con los otros métodos que basan su análisis en la IGA, de allí la mayor cantidad de ambientes agrupados en el primer factor.

Con base en los resultados antes señalados, se puede resumir que los ambientes agrupados y coincidentes por los métodos AF, % SP, $r_{(xy)}$ y TL sugieren que sería posible reducir el número de localidades y contribuir a la economía de recursos, abriendo la posibilidad de explorar nuevos ambientes para la validación de nuevos cultivares de arroz bajo riego en Venezuela.

En general, los métodos utilizados no fueron eficientes en identificar ambientes diferentes cuando se utilizaron distintas épocas de siembra en una misma localidad; en otras palabras, no existe consistencia para interacción genotipo por año y sí para genotipo por localidad, resultados similares fueron presentados por Peluzio et al. (2012).

En Venezuela, trabajos específicos de estratificación ambiental de arroz bajo riego por cualquiera de los métodos existentes, no se han publicado y, de manera general, es escasa en la bibliografía internacional. Por el contrario, estudios de estratificación de ambientes en maíz son comunes y prevalecen IGA de tipo compleja sobre el tipo simple de Cruz y Castoldi (1991), y en general, correlaciones de magnitudes bajas, no significativas (Garbuglio et al., 2007; Felipe et al., 2010; Ribeiro et al., 2011; Buzinaro, 2014). En cultivos como caraota y soya se mostraron resultados con predominancia de IGA tipo compleja por el método de Cruz y Castoldi (1991), incluso algunas investigaciones presentaron correlaciones significativas superiores a 0,50, demostrando la importancia de los métodos que agrupan ambientes utilizando análisis de correlación (Pereira et al., 2010; Peluzio et al., 2012; Pereira et al., 2013; Tavares et al., 2017).

La correlación de Spearman (r_s) utilizada para medir el grado de asociación entre los métodos de estratificación utilizados, permitió discriminar los mismos entre: complementarios cuando su grado es moderado, independientes cuando su grado de asociación es bajo, y similares cuando su grado es muy fuerte. Sin embargo, con base en los

ambientes de producción de arroz en Venezuela, el método AF fue considerado como más eficiente y preciso, seguido de % PS y TL conjuntamente con $r_{(xy)}$.

Conclusiones

Se detectó interacción genotipo por ambiente significativa de magnitud 35 % para el rendimiento de arroz en Venezuela.

El método análisis de factores fue el más eficiente y preciso para identificar ambientes homogéneos, y puede ser complementado con los métodos proporción simple de la interacción y el tradicional de Lin para estratificación de ambientes de arroz con riego en Venezuela.

Los métodos proporción simple de la interacción y correlación de Pearson presentaron alta asociación en identificar ambientes homogéneos, por lo que se recomienda su uso simultáneo con otro método como el tradicional de Lin.

Los ambientes Bancos de San Pedro (estado Guárico) y Asoportuguesa (estado Portuguesa), durante ambas épocas de siembra, revelaron mayor información, por lo cual fueron sugeridos para la evaluación de genotipos de arroz bajo riego en Venezuela. Lo contrario ocurrió con los ambientes Araure, Algodonal (estado Portuguesa) y Torunos (estado Barinas).

Literatura citada

- Acevedo M., R. Álvarez, R. Silva, O. Torres y E. Reyes. 2019. Interacción genotipo ambiente en arroz para identificar megaambientes y ambientes ideales mediante el modelo de Regresión por sitios (SREG) y biplot GGE. *Bioagro* 31(1):35-44.
- Acevedo, M., E. Reyes, W. Castrillo, O. Torres, C. Marín, R. Álvarez, O. Moreno, y E. Torres. 2010. Estabilidad fenotípica de arroz de riego en Venezuela utilizando los modelos Lin-Binns y AMMI. *Agro. Trop.* 60(2):131-138.
- Benacchio, S., y W. Avilán. 1991. Zonificación agroecológica del cultivo del arroz en Venezuela. Fondo de Investigaciones Agropecuarias (FONAIAP), Maracay, VEN.
- Bernardo, R. 2002. *Breeding for quantitative traits in plants*. 2nd ed. Stemma Press, Woodbury, MN, USA.
- Buzinaro, R. 2014. *Interação de genótipos de milho vs locais, anos e épocas de semeadura*. Diss. MSc., Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, BRA.
- Cruz, C.D. 2006. Programa GENES: biometria. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, BRA.
- Cruz, C., e P. Carneiro. 2006. *Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético*. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, BRA.
- Cruz, C., e F. Castoldi. 1991. Decomposição da interação genótipos x ambientes em partes simples e complexa. *Rev. Ceres* 38:422-430.
- Eberhart, S., and W. Russell. 1996. Stability parameters for comparing varieties. *Crop. Sci.* 6:36-40. doi:10.2135/cropsci1966.0011183X000600010011x
- FEDEAGRO (Confederación de Asociaciones de Productores Agropecuarios). 2017. *Contiúa la recesión agrícola y la indiferencia por la producción de alimentos. Los resultados de la agricultura vegetal en el año 2017*. FEDEAGRO, VEN. <https://fedegro.org/resultados-de-la-agricultura-vegetal-del-2017/> (consultado 4 jun. 2018).
- Felipe, C., J. Duarte, e L.F. Camarano. 2010. Estratificação ambiental para avaliação e recomendação de variedades de milho no estado de Goiás. *Pesq. Agropec. Trop.* 40:186-199. doi:10.5216/pat.v40i2.6158

- Finney, D. 1980. Statistics for biologists. Chapman and Hall, London, GBR.
- Garbuglio, D., A. Gerage, M. de-Araujo, N. Fonseca, e P. Shioga. 2007. Análise de fatores e regressão bissegmentada em estudos de estratificação ambiental e adaptabilidade em milho. *Pesq. Agropec. Bras.* 42:183-191. doi:10.1590/S0100-204X2007000200006
- INIA (Instituto de Investigaciones Agropecuarias). s.f. Datos climáticos 2012-2013. INIA, VEN. <http://www.agrometeorologia.inia.gob.ve/index.php/datos-climaticos> (consultado 12 jun. 2018).
- Lin, C. 1982. Grouping genotypes by a cluster method directly related to genotype-environment interaction mean square. *Theor. Appl. Genet.* 62:277-280. doi:10.1007/BF00276251
- Murakami, D., and C. Cruz. 2004. Proposal of methodologies for environment stratification and analysis of genotype adaptability. *Crop. Breed. Appl. Biot.* 4:7-11. doi:10.12702/1984-7033.v04n01a02
- Peluzio, J., G. Geromini, J. da-Silva, F. Afféri, e J. Vendruscolo. 2012. Estratificação e dissimilaridade de ambientes para avaliação de cultivares de soja no estado de Tocantins. *Biosci. J.* 28:332-337.
- Pereira, H., A. da-Costa, C. Melo., L.M.J. Del-Peloso, L., Farias, e A. Wendland. 2010. Interação entre genótipos de feijoeiro e ambientes no Estado de Pernambuco: estabilidade, estratificação ambiental e decomposição da interação. *Ciências Agrárias* 34:2603-2614. doi:10.5433/1679-0359
- Pereira, H., L.C. Melo, L. de-Faria, M. Del-Peloso, e A. Wendland. 2013. Estratificação ambiental na avaliação de genótipos de feijoeiro-comum tipo Carioca em Goiás e no Distrito Federal. *Pesq. Agropec. Bras.* 45:554-562. doi:10.1590/S0100-204X2010000600004
- Pimentel-Gomes, F P. 2000. Curso de estatística experimental. Nobel, São Paulo, BRA.
- Ramalho, M., J. dos-Santos, A. Abreu, e J. Nunes. 2012. Aplicação da genética quantitativa no melhoramento de plantas autógamas. Universidade Federal de Lavras, BRA.
- Ribeiro, J.Z., e M.I. de-Almeida. 2011. Estratificação ambiental pela análise da interação genótipo ambiente em milho. *Pesq. Agropec. Bras.* 46:875-883. doi:10.1590/S0100-204X2011000800013
- SAS Institute Inc. 2002. The SAS system for window. V. 8. SAS Institute Inc. Cary, NC, USA.
- Rohlf, F.J., and R. Sokal. 1981. Comparing numerical taxonomic studies. *Systematic Zool.* 30:459-490. doi:10.1093/sysbio/30.4.459
- Tavares, T., S. Sousa, F. Salgados, G. Santos, M. Lopes, e R. Fidelis. 2017. Adaptabilidade e estabilidade da produção de grão em feijão comum (*Phaseolus vulgaris*). *Rev. Ciênc. Agr.* 40:411-418. doi:10.19084/RCA16058
- Yan, W. 2002. Singular-value partition for biplot analysis of multi-environment trial data. *Agron. J.* 94:990-996. doi:10.2134/agronj2002.9900