



Universidad de Concepción
Dirección de Postgrado
Facultad de Agronomía - Programa de Magister en Ciencias Agronómicas

AVANCE GENÉTICO EN RENDIMIENTO DEL MEJORAMIENTO DE ARROZ

(*Oryza sativa* L.) EN CHILE

Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias Agronómicas con
Mención en Producción y Protección Vegetal

JULIETA LIZBETH PARADA SOTO

**CHILLÁN-CHILE
2016**

Profesor Guía: Mario Paredes Cárcamo
Genética / Biotecnología
Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA)



**AVANCE GENÉTICO EN RENDIMIENTO DEL MEJORAMIENTO DE ARROZ (*Oryza sativa*
L.) EN CHILE.**

Aprobada por:

Mario Paredes Cárcamo
Ing. Agrónomo, M. Sc., PhD

Profesor Guía

Nelson Zapata San Martín
Ing. Agrónomo, Dr.



Profesor Co-Guía

Jorge Campos Parra
Prof. De Estado en Matemática, Mg. E Cs.

Evaluador Interno

Inés Figuera Cares
Ing. Agrónomo, Mg. Cs., Dr. Cs.

Directora de Programa

TABLA DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
HIPÓTESIS.....	5
OBJETIVO GENERAL.....	5
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
LITERATURA CITADA.....	5
CAPÍTULO I.....	10
Avance genético en rendimiento del mejoramiento de arroz (<i>Oryza sativa</i> L.) en Chile.....	10
Resumen.....	10
Introducción.....	11
Materiales y Métodos.....	13
Resultados y Discusión.....	17
Conclusiones.....	28
Agradecimientos.....	28
Literatura citada.....	28

ÍNDICE DE CUADROS Y FIGURAS

Figura 1. Rendimiento potencial de líneas avanzadas de arroz versus el rendimiento promedio nacional de los cultivares comerciales que siembran los agricultores.....	03
---	----

CAPÍTULO 1

Cuadro 1. Criterios de selección de los ensayos y líneas experimentales a evaluar, según tasa de sustitución y coeficiente de variación.....	16
Cuadro 2. Comparación de las metodologías 1 y 2.....	17
Cuadro 3. Contribución relativa de los efectos genéticos, ambientales y de la interacción genotipo ambiente respecto a la variabilidad total (no error) del carácter rendimiento.....	19
Figura 2. Rendimiento medio (medias ajustadas) ($t\ ha^{-1}$) de las líneas experimentales evaluadas versus los cultivares testigos durante los 21 años analizados en este estudio.....	20
Figura 3. Regresión lineal de la ganancia genética de las líneas experimentales avanzadas obtenida en un período de 21 años (1994 – 2014), con respecto a la variable rendimiento ($t\ ha^{-1}$).....	21
Figura 4. Regresión lineal de ganancia genética de líneas avanzadas y los cultivares utilizadas como testigos, obtenida en un período de veintiún años, con respecto a la variable rendimiento ($t\ ha^{-1}$).....	22
Figura 5. Regresión lineal de la ganancia genética del cultivar testigo Diamante-INIA, obtenida en un período de 21 años (1994 – 2014), respecto a la variable rendimiento ($t\ ha^{-1}$).....	23
Figura 6. Rendimiento medio (medias ajustadas) ($t\ ha^{-1}$) de las líneas evaluadas durante los años 2005, 2009 al 2014.....	24
Figura 7. Regresión lineal de la ganancia genética obtenida en los años 2005, 2008, 2009, 2011, 2012, 2013 y 2014, con respecto a la variable rendimiento ($t\ ha^{-1}$).....	25

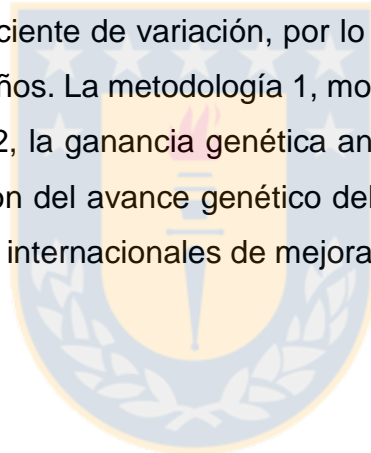
Figura 8. Regresión lineal de la ganancia genética de líneas avanzadas y cultivares utilizados como testigos, en los años 2005, 2008, 2009, 2011, 2012, 2013 y 2014, con respecto a la variable rendimiento ($t\ ha^{-1}$).....26

Figura 9. Regresión lineal de la ganancia genética del cultivar testigo Diamante-INIA, obtenida en un período de 7 años (2005, 2008, 2009, 2011 – 2014), respecto a la variable rendimiento ($t\ ha^{-1}$).....27



RESUMEN

El análisis del avance genético en diferentes programas de mejoramiento genético de arroz (PMGA) permite indicar que se han obtenido importantes mejoras en comportamiento agronómico, tales como: precocidad, altura de planta, rendimiento de campo e industrial de los cultivares. Con el objetivo de evaluar la eficiencia del PMGA de INIA, Chile se determinó la ganancia genética del material desarrollado en 21 temporadas, con respecto a la variable rendimiento. Para este análisis se utilizaron 61 ensayos regionales del PMGA del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), desde el año 1994 hasta el año 2014. La evaluación de la ganancia genética se realizó mediante dos metodologías, para lo cual se ajustó un modelo lineal mixto el programa estadístico Infostat. La metodología 1 evaluó la ganancia genética del rendimiento en los 21 años en el período mencionado anteriormente. En la metodología 2, se midió también la ganancia genética, pero se establecieron algunas restricciones como la tasa de sustitución y el coeficiente de variación, por lo cual, se consideraron en este análisis sólo datos de siete años. La metodología 1, mostró una ganancia genética de 0,79%. Con la metodología 2, la ganancia genética anual fue 1,57%. De lo anterior, se concluye que la estimación del avance genético del PMGA del INIA es similar, al obtenido en otros programas internacionales de mejoramiento genético de arroz.



INTRODUCCIÓN GENERAL

Los cereales, principalmente trigo (*Triticum aestivum* L.), arroz (*Oryza sativa* L.) y maíz (*Zea mays* L.), proveen aproximadamente el 50% de las calorías de la alimentación humana (Tweeten y Thompson, 2008). El arroz es el alimento básico de más de la mitad de la población mundial (FAO, 2004), la producción de este cultivo en 2013 fue de 747,5 millones de toneladas, en una superficie de 165 millones de hectáreas (FAO, 2014).

En Chile, el cultivo del arroz fue introducido en la década de 1920 y en el censo de 1938 se estimaba una superficie sembrada de casi 3.000 hectáreas (Hepp, 1954). En las últimas 10 temporadas la superficie sembrada ha fluctuado entre las 21 y 28 mil hectáreas y si se analiza lo ocurrido en el país desde 1979 al 2016, se observa un aumento sostenido del rendimiento por hectárea, con un incremento importante en las últimas temporadas, el que llegó a 65,6 qqm ha⁻¹, en 2015 / 16. Paralelo a este aumento sostenido del rendimiento, se observa una reducción paulatina de la superficie sembrada, de 40.840 ha en 1979 / 80 a 26.540 ha en la temporada 2015 / 16. Sin embargo, a pesar de la reducción de 14.300 ha se ha producido un aumento en la producción de 78.567 toneladas durante este mismo período (ODEPA, 2017).

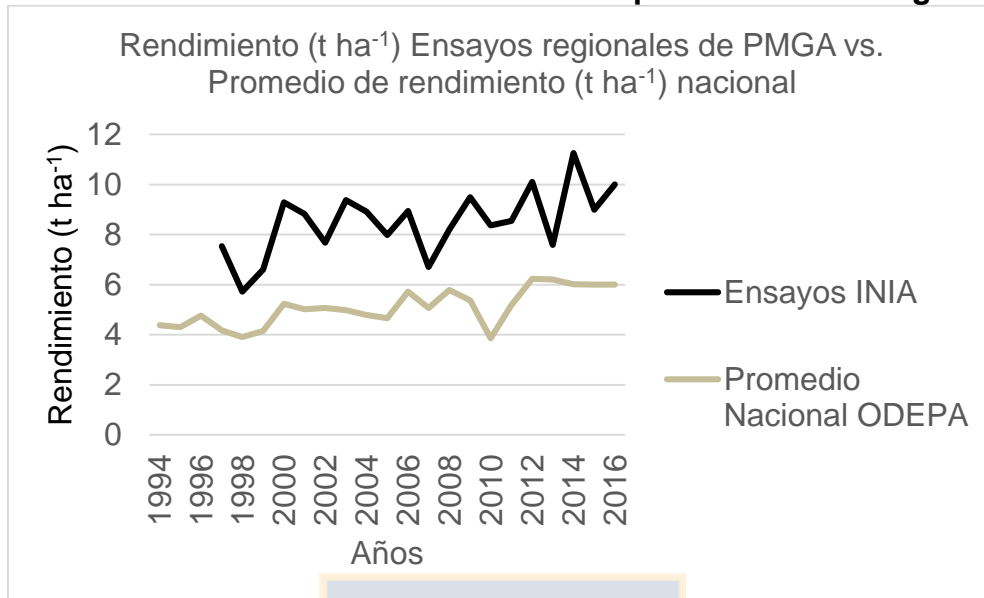
El rendimiento de un cultivo se puede mejorar a través del mejoramiento genético (Egli, 2008) y de las prácticas agronómicas (Duvick, 2005). El mejoramiento de plantas es un proceso de larga duración, donde las decisiones que se toman hoy mostrarán sus consecuencias años más tarde en el comportamiento de los cultivares desarrollados. Esta situación involucra la inversión de una importante cantidad de recursos económicos, físicos (infraestructura) y humanos. Debido a esta situación es importante monitorear la eficiencia de los programas de mejoramiento a través del tiempo (Alves *et al.*, 1999; Tabien *et al.*, 2008; Cargnin *et al.*, 2009; Breseghello *et al.*, 2011).

En Chile, la generación de cultivares de arroz, ha estado siempre ligada al financiamiento del Estado, con escasas excepciones. Los primeros trabajos de mejoramiento genético en arroz se iniciaron en los años 50 en el Departamento de Genética y Fitotecnia del Ministerio de Agricultura, los que continuaron en 1964 cuando se creó el Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). Actualmente, el Programa de Mejoramiento

Genético de Arroz (PMGA) tiene como objetivo general desarrollar cultivares de alto rendimiento y calidad aceptadas por el mercado y como objetivos específicos: a) aumentar el potencial y estabilidad del rendimiento, b) aumentar la tolerancia a bajas temperaturas, c) mejorar la calidad del grano (industrial y culinaria), d) mejorar las características agronómicas (precocidad, resistencia a la tendadura, altura de planta, resistencia al desgrane), e) aumentar la resistencia a pudrición del tallo y vaina, y f) diversificar tipos de arroz comercializados en el país (Paredes *et al.*, 2013). La liberación de cultivares de arroz INIA, comenzó a fines de la década del 70, después de la consolidación del Programa de Mejoramiento Genético de Arroz. Es así como en el año 1979, INIA lanza los primeros cultivares mejorados al mercado con diferentes tipos de grano, siendo éstos producto de cruzamientos. Por ejemplo, los cultivares Quella-INIA y Ñiquén-INIA de grano corto, y Diamante-INIA, cultivar de grano largo-ancho translúcido, alto rendimiento, estabilidad y buena calidad industrial, con un porcentaje de grano entero aceptado por el molino. Con el objetivo de diversificar el mercado, INIA liberó Buli-INIA (1991), cultivar de grano largo-fino translúcido, y de muy buena calidad culinaria; Brillante-INIA (1997), cultivar de grano largo-ancho, translúcido y de buen potencial de rendimiento; Ambar-INIA (2003), cultivar de grano corto glutinoso y de bajo contenido de amilosa; Zafiro-INIA (2009), cultivar de grano largo-ancho translúcido de muy buen rendimiento y calidad industrial, y liberó al mercado Cuarzo-INIA el año 2015, cultivar de grano largo-ancho translúcido, de buen rendimiento en grano e industrial (Paredes *et al.*, 2013).

Si bien los cultivares de arroz INIA que actualmente se encuentran en el mercado chileno tienen un alto potencial de rendimiento sobre 12 t ha^{-1} y una calidad industrial aceptable por la industria arrocera (sobre 60% grano entero); existen factores, tanto de manejo agronómico, como climáticos, que influyen en que dicho potencial se exprese (Figura 1).

Figura 1. Rendimiento potencial de líneas avanzadas de arroz versus el rendimiento promedio nacional de los cultivares comerciales que siembran los agricultores.



Los años 1995 y 1996 no marcan valor porque el PMGA de INIA no cuenta con los datos de rendimiento en sus archivos (Figura 1).

Fuente: Elaborado por el autor con datos de INIA y ODEPA.

Estudios sobre el avance genético, permiten evaluar la ganancia genética de los programas de fitomejoramiento, lo que se traduce en un conocimiento de fundamental importancia para evaluar el resultado técnico es decir, tener la posibilidad de tener una estimación de la eficiencia de los métodos de selección utilizados, y además, dimensionar el costo beneficio del trabajo realizado, para la institución y la sociedad. El resultado de este análisis permite la posibilidad de plantear el uso de nuevos métodos que permitan mejorar la eficiencia de los métodos utilizados (Atroch y de Sousa, 2000), así como también validar las estrategias empleadas y proponer estrategias futuras (Jiang *et al.*, 2007; Menezes *et al.*, 2008).

El análisis del avance genético en diferentes programas de mejoramiento de arroz ha permitido indicar que se han obtenido importantes mejoras genéticas en características agronómicas tales como precocidad, altura de planta, rendimiento de campo e industrial de los cultivares en Estados Unidos (Tabien *et al.*, 2008); precocidad, y altura de planta

en el PMGA de Brasil desde 1984 al 2002 y con resultados no significativos para rendimiento entre los años 1984 y 1992, y significativos para el período 1992 al 2002 (Breseghello *et al.*, 2011); rendimiento en el PMGA de Minas de Gerais desde 1998 al 2010 (DoVale *et al.*, 2012); precocidad en el PMGA de Minas de Gerais, Brasil, en el período de 1974 a 1994 (Soares *et al.*, 1999); rendimiento en grano en el PMGA de tierras altas y bajas del Estado de Amapá, Brasil, por un período de 5 años (Atroch *et al.*, 1999; Atroch y de Sousa, 2000); rendimiento en el PMGA del Centro Norte de Brasil (Nakano *et al.*, 2000).

Estudios en avance genético en trigo han determinado también importantes ganancias en rendimiento mediante el desarrollo de cultivares con características adecuadas de precocidad, altura y calidad de grano (Waddington *et al.*, 1986; Hucl y Baker, 1987; Cox *et al.*, 1988; Perry y D'Antuono, 1989; Sayre *et al.*, 1997; Donmez *et al.*, 2001; Rodrigues *et al.*, 2007; Graybosch y Peterson, 2010; Engler y del Pozo, 2013).

El éxito de un programa de mejoramiento radica en la habilidad de entregar a los agricultores genotipos que garanticen un mejor comportamiento en términos de rendimiento y/o calidad, entre otras. Estas características son el resultado de interacciones entre la constitución genética de la planta (genotipo) y las condiciones (clima, suelo, factores bióticos y/o abióticos, y agronómicos) en que la planta se desarrolló (ambiente). Por lo tanto, el estudio de la interacción genotipo x ambiente es un factor importante a tener en cuenta en el desarrollo de nuevos cultivares, ya que permite identificar genotipos estables que tienen un comportamiento más uniforme a través de diferentes ambientes (Perry y D'Antuono, 1989; Yan y Hunt, 1996; Annicchiarico, 2002), para lo cual se han descrito una serie de metodologías estadísticas para su análisis, tales como modelos basados en componentes principales (PCA) AMMI (Additive Main Effects and Multiplicative Interaction) y SREG (Sites Regression Analysis) en maíz (Kandus *et al.*, 2010), ANOVA (Analysis of Variance) combinados y GGE biplot (Genotype and Genotype by Environment interaction) en trigo y cebada (Farshadfar *et al.*, 2012) y QTL (Quantitative Trait Loci) (Malosetti *et al.*, 2013).

HIPÓTESIS

El material desarrollado por el Programa de Mejoramiento Genético de Arroz de INIA, en los últimos 21 años, ha presentado una ganancia, con respecto a rendimiento ($t\ ha^{-1}$).

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la eficiencia del Programa de Mejoramiento Genético de Arroz de INIA, a través de la determinación de la ganancia genética de los genotipos desarrollados por éste, en 21 temporadas (1993 / 94 a 2013 / 14), con respecto a la variable de rendimiento (t) en campo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Estimar componentes de varianza para cada año, con el fin de realizar un análisis exploratorio de los datos.
2. Estimar tasas de sustitución o porcentaje de recambio anual de las líneas avanzadas.
3. Estimar un modelo lineal mixto para ajuste de medias de la variable de rendimiento.
4. Determinar mediante un modelo lineal mixto, el avance genético con respecto a rendimiento de campo, con el uso de dos metodologías.

LITERATURA CITADA

Alves, A., Guimaraes, P., de Moraes, O., Soares, P., de Sousa, T. y Alves, M. 1999. Progreso genético obtido pelo melhoramento do arroz de sequeiro em 21 anos de pesquisa em Minas Gerais. *Pesq. Agropec. Bras.* 34(3): 415-424.

Annicchiarico, P. 2002. Genotype x environment interaction. Challenges and opportunities for plant breeding and cultivar recommendations. Food and Agriculture Organization of

the United Nations (FAO). Roma, Italia.

Atroch, A., y de Sousa, G. 2000. Progreso genético em arroz de Várzea Úmida no estado do Amapá. *Pesq. Agropec. Bras.* 35(4): 767-771.

Atroch, A., Peixoto de Moraes, O., Nakano, H.P.R., y Da María de Castro, E. 1999. Progreso do melhoramento genético do arroz de sequeiro no estado do Amapá. *Pesq. Agropec. Bras.* 34(9): 1623-1632.

Breseghello, F., Peixoto de Moraes, O., Valle, P., Simoes, A., da Maia, E., Perpétuo, E., Pereira, A., Almeida, J., de Matos, A., Marcio, M. and Pereira, J. 2011. Results of 25 years of upland rice breeding in Brasil. *Crop Sci.* 51: 914-923.

Cargnin A., Alves M., Fronza V., and Martellet, C.2009. Genetic and environmental contributions to increased wheat yield in Minas Gerais, Brazilian. *Sci. Agric.* 66(3): 317-322.

Cox, T.S., Shroyer, J.P., Ben-Hui, L., Sears, R.G., and Martin, T.J. 1988. Genetic improvement in agronomic traits of Hard Red Winter wheat cultivars from 1919 to 1987. *Crop Sci.* 28:756-760.

Donmez, E., Sears, R.G., Shroyer, J.P., and Paulsen, G.M. 2001. Genetic gain yield attributes of winter wheat in the Great Plains. *Crop Sci.* 41:1412-1419.

DoVale, J.C., Soares, P.C., Cornélio, V.M.O., Souza Reis, M., Borges, V., Bisi, R.B., Soares, A.A., y Fritsche-Neto, R. 2012. Contribucao genetica no produtividade do arroz irrigado em Minas Gerais no período de 1998 a 2010. *Bragantia*, 71 (4):460-466.

Duvick, D. 2005. The contribution of breeding to yield advances in maize (*Zea mays* L.).

Adv. in Agron. 86: 83-145.

Egli, D. 2008. Comparison of corn and soybean yields in the United States: historical trends and future prospects. Agron. J. 100: 79-88.

Engler, A. and del Pozo, A. 2013. Assessing long - and short – term trends in cereal yields: the case of Chile between 1929 y 2009. Ciencia. Inv. Agr. 40(1): 55-67.

Farshadfar, El, Mohammadi, R., Aghaee, M. and Vaisi, Z. 2012. GGE biplot analysis of genotype x environment interaction in wheat-barley dosomic addition lines. Aust. J. Crop Sci. 6 (6): 1074-1079.

FAO. 2004. El arroz es vida [en línea]. FAO. <<http://www.fao.org/rice2004/es/rice-us.htm>>. [Consulta: 07 octubre 2013].

FAO. 2014. Seguimiento del mercado del arroz [en línea]. FAO. <<http://www.fao.org/economic/est/publicaciones/publicaciones-sobre-el-arroz/seguimiento-del-mercado-del-arroz-sma/es/>>. [Consulta: 21 enero 2015].

Graybosch, R.A. and Peterson, C.J. 2010. Genetic improvement in winter wheat yields in the Great Plains of North America, 1959-2008. Crop Sci. 50: 1882-1890.

Hepp, D. 1954. El cultivo del arroz. Ministerio de Agricultura. DGA, Circular N°1. Santiago, Chile, 14p.

Hucl, P. and Baker, R.J. 1987. A study of ancestral and modern Canadian spring wheats. Can. J. Plant Sci. 67:87-97.

Jiang, H., Guo, L-B., and Qian, Q. 2007. Recent Progress on rice genetic in China. J.

Integr. Pl. Biol. 49(6):776-790.

Kandus, M.D.; Almorza, D.; Ronceros, R.B. and Salerno, J.C. 2010. Statistical models for evaluating the genotype-environment interaction in maize (*Zea mays* L.) ØYTON 79: 39-46.

Malosetti, M., Ribaut, J-M. and van Eeuwijk, F. A. 2013. The statistical analysis of multi-environment data: modeling genotype-by-environment interaction and its genetic basis. Front. Physiol. 4:44.

Menezes J., Ramalho, M., y Abreu, A. 2008. Selecao recorrente para tres caracteres do feijoeiro. Bragantia. 67(4): 833-838.

Nakano, P.H., Pereira, J.A., Peixoto de Morais, O, Guimaraes, E.P., y Yokokura, T. 2000. Aumento de la productividad del grano para el mejoramiento genético de arroz en el Centro norte de Brasil. Pesq. Agropec. Bras.35(8): 1595-1604.

ODEPA 2017. Información nacional de superficie sembrada, producción y rendimientos anuales. [en línea]. <http://www.odepa.gob.cl/estadisticas/productivas/>>. [Consulta: 17 enero 2017].

Paredes, M., Becerra, V. y Saavedra F. 2013. Variedades de arroz INIA. Tierra adentro (104): 17-21.

Perry, M. and D'Antuono, M., 1989. Yield improvement and associated characteristics of some Australian spring wheat cultivars introduced between 1860 and 1982. Aust. J. Agric. Res. 40: 457-472.

Rodrigues, O., Lhamby, J.C., Didonet, A.D. and Marchese. J.A.2007. Fifty years of wheat

breeding in Southern Brazil: *Pesq. Agropec. Bras.* 42(6):817-825.

Sayre, K.D., Rajaram, S. and Fisher, R.A. 1997. Yield potential progress in short bread wheats in Northern Mexico. *Crop Sci.* 37:36-42.

Soares, A.A., Santos, G.P., Peixoto de Moraes, O., Soares, P.C., De Sousa Reis, T., y de Souza, M. A. 1999. Progreso genético obtenido por mejora de arroz seco en 21 años de investigación en Minas Gerais. *Pesq. Agropec. Bras.* 34(3): 415-424.

Tabien, R.E., Samonte, S.O.PB, and McClung, A.M. 2008. Forty-eight years of rice improvement in Texas since the release of cultivar Bluebonnet in 1944. *Crop Sci.* 48:2097-2106.

Tweeten, L., and Thompson, S. 2008. Long – term agricultural output supply – demand balance and real farm and food prices. Working paper AEDE-WP 0044-08, Ohio State University, Columbus, OH.

Waddington, S.R., Ransom, J.K., Osmanzai, M., and Saunders, D.A. 1986. Improvement in the yield potential of bread wheat adapted to northwest Mexico. *Crop Sci.* 26(4): 698-703.

Yan, W. and Hunt L.1996. Genotype by environment interaction and crop yield. *Plant Breed. Rev.*16:135-178.

CAPÍTULO I

AVANCE GENÉTICO EN RENDIMIENTO EN EL MEJORAMIENTO DE ARROZ (*ORYZA SATIVA* L.) EN CHILE

GENETIC GAIN IN YIELD RICE (*ORYZA SATIVA* L.) BREEDING IN CHILE

RESUMEN

El análisis del avance genético en diferentes programas de mejoramiento genético de arroz (PMGA) permite indicar que se han obtenido importantes mejoras genéticas en comportamiento agronómico, tales como: precocidad, altura de planta, rendimiento de campo e industrial de los cultivares; precocidad, y altura de planta. Con el objetivo de evaluar la eficiencia del PMGA de INIA, Chile se determinó la ganancia genética del material desarrollado en 21 temporadas, con respecto a la variable rendimiento. Para este análisis se utilizaron 61 ensayos regionales del PMGA del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), desde el año 1994 hasta el año 2014. La evaluación de la ganancia genética se realizó mediante dos metodologías, para lo cual se ajustó un modelo lineal mixto con el programa estadístico Infostat. La metodología 1 evaluó la ganancia genética del rendimiento en los 21 años en el período mencionado anteriormente. En la metodología 2, se midió también la ganancia genética, pero se establecieron algunas restricciones como la tasa de sustitución y el coeficiente de variación, por lo cual, se consideraron en este análisis sólo datos de siete años. La metodología 1, mostró una ganancia genética de 0,79%. Con la metodología 2, la ganancia genética anual fue 1,57%. De lo anterior, se concluye que la estimación del avance genético del PMGA del INIA es similar, al obtenido en otros programas internacionales de mejoramiento genético de arroz.

Palabras clave: Avance genético, *Oryza sativa* L., mejoramiento, arroz.

INTRODUCCIÓN

Los cereales, principalmente trigo (*Triticum aestivum* L.), arroz (*Oryza sativa* L.) y maíz (*Zea mays* L.), proporcionan aproximadamente el 50% de las calorías en la alimentación humana (Tweeten y Thompson, 2008). La sostenibilidad de la producción de arroz depende del desarrollo de nuevas variedades de alto rendimiento con un comportamiento estable en diversos ambientes (Akter *et al.*, 2014). El rendimiento de un cultivo se puede incrementar a través del mejoramiento genético (Egli, 2008) y de las prácticas agronómicas (Duvick, 2005). El mejoramiento de plantas es un proceso de larga duración, donde las decisiones que se toman hoy mostrarán sus resultados años más tarde a través del comportamiento de los cultivares desarrollados. Esta situación involucra la inversión de una importante cantidad de recursos económicos, físicos (infraestructura) y humanos. Debido a esta situación es importante monitorear la eficiencia de los programas de mejoramiento a través del tiempo (Alves *et al.*, 1999; Tabien *et al.*, 2008; Cargnin *et al.*, 2009; Breseghello *et al.*, 2011).

Los estudios sobre el avance genético, permiten evaluar la ganancia genética de los programas de fitomejoramiento, lo que se traduce en un conocimiento de fundamental importancia para medir el resultado técnico, es decir, estimar la eficiencia de los métodos y criterios de selección utilizados, y además, dimensionar el costo/beneficio del trabajo realizado, para la institución y la sociedad. El resultado de este análisis permite la posibilidad de plantear el uso de nuevos métodos que permitan mejorar la eficiencia de los métodos utilizados (Atroch y de Sousa, 2000), así como también validar las estrategias empleadas y proponer estrategias futuras (Jiang *et al.*, 2007; Menezes *et al.*, 2008).

El análisis del avance genético en diferentes programas de mejoramiento genético de arroz (PMGA) ha permitido indicar que se han obtenido importantes mejoras genéticas en comportamiento agronómico, tal como: precocidad, altura de planta, rendimiento de campo e industrial de los cultivares en Estados Unidos (Tabien *et al.*, 2008); precocidad, y altura de planta en el PMGA de Brasil desde 1984 al 2002 (Breseghello *et al.*, 2011);

rendimiento en el PMGA de Minas de Gerais desde 1998 al 2010 (DoVale *et al.*, 2012); precocidad en el PMGA de Minas de Gerais, Brasil, en el período de 1974 a 1994 (Soares *et al.*, 1999); rendimiento en grano en el PMGA de tierras altas y bajas del Estado de Amapá, Brasil, en el período de 1990 a 1995 (Atroch *et al.*, 1999; Atroch y de Sousa, 2000); y rendimiento en el PMGA del Centro Norte de Brasil (Nakano *et al.*, 2000).

El éxito de un programa de mejoramiento radica en la habilidad de entregar a los agricultores genotipos que garanticen un mejor comportamiento en términos de rendimiento y/o calidad, entre otras características. Estas características son el resultado de interacciones entre la constitución genética de la planta (genotipo), las condiciones ambientales y la interacción entre el genotipo por el ambiente. Por lo tanto, el estudio de la interacción genotipo x ambiente es un factor importante a tener en cuenta en el desarrollo de nuevos cultivares, ya que permite identificar genotipos estables que posean un comportamiento más uniforme a través de diferentes ambientes (Perry y D'Antuono, 1989; Yan y Hunt, 1996; Annicchiarico, P. 2002).

Para realizar este estudios de avance genético e interacción genotipo por ambiente, se han utilizado por ejemplo, una serie de metodologías estadísticas, tales como, modelos basados en componentes principales (PCA) AMMI (Additive Main Effects and Multiplicative Interaction) y SREG (Sites Regression Analysis) en maíz (Kandus *et al.*, 2010), ANOVA (Análisis of Variance) combinados y GGE biplot (Genotype and Genotype by Environment interaction) en trigo y cebada (Farshadfar *et al.*, 2012) y; AMMI y GGE biplot en maíz (Malosetti *et al.*, 2013), y en arroz, AMMI biplot (Akter *et al.*, 2014) y GGE biplot (Donoso *et al.*, 2016).

En Chile, los primeros trabajos de mejoramiento genético en arroz los iniciaron los agricultores en la década de 1930, utilizando el método de introducción de variedades extranjeras y su posterior selección en el país. Este trabajo fue complementado por el Departamento de Genética y Fitotecnia del Ministerio de Agricultura en los años 50, cuyo trabajo fue traspasado al Instituto de Investigación Agropecuaria (INIA), en 1964, quién ha mantenido este programa sin interrupción en el tiempo.

El programa de Mejoramiento Genético de arroz del INIA ha sido el responsable de proveer prácticamente casi todos los cultivares sembrados por los agricultores desde fines de los años 70. Si bien los cultivares de arroz INIA que actualmente se encuentran en el mercado chileno tienen un alto potencial de rendimiento sobre 12 t ha^{-1} y una calidad industrial aceptable por la industria arrocera (sobre 60% de grano entero); no existe un estudio que indique el avance genético logrado por el PMGA en los últimos 20 años. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es determinar la ganancia genética de los genotipos desarrollados por el PMGA, INIA Chile, utilizando dos métodos estadísticos, analizando la variable rendimiento en grano paddy (t ha^{-1}).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área y período del estudio

Se utilizaron 61 ensayos regionales del Programa de Mejoramiento Genético de INIA, Chile, donde se evaluaron líneas experimentales avanzadas teniendo como testigos a las variedades comerciales disponibles a la fecha. Estos ensayos estuvieron ubicados en toda la zona arrocera del país, comprendida entre la región del Libertador Bernardo O'Higgins ($33^{\circ}51' \text{L.S}$), y la región del Biobío, y ($38^{\circ}30' \text{L.S}$), durante un período de 21 años (1994 a 2014). En cada año se realizó en promedio tres ensayos (tres localidades por año). Cada ensayo estuvo formado por un promedio de 20 genotipos (líneas avanzadas y cultivares como testigos), con un diseño experimental de bloques completos al azar, con tres repeticiones. Es importante mencionar que para este análisis de ganancia genética en particular, se consideraron sólo las líneas avanzadas, sin embargo, de manera comparativa, por separado se realizó el mismo análisis a las variedades comerciales utilizadas como testigos. Cada genotipo fue sembrado en una parcela $3 \times 5 \text{ m}$ (15 m^2).

El manejo agronómico fue el siguiente: a) Preparación de suelo: se dejó una cama de semillas mullida y adecuada para el desarrollo radicular de la planta; b) Siembra: Se

realizó en la fecha recomendada, primera quincena de octubre y bajo el sistema de inundación permanente con semilla de arroz pre-germinado (semilla en remojo durante 24 horas y en reposo a la sombra, por otras 24 horas); c) Fertilización: pre-siembra incorporada en base a nitrógeno (N) alrededor de 50 unidades, aproximadamente 60 unidades de fósforo (P_2O_5) y 100 a 120 unidades de potasio (K_2O), según las recomendaciones obtenidas a partir del análisis químico de suelo. Se aplicó una segunda fertilización con 50 unidades de N en plena macolla y una tercera aplicación de aproximadamente 20 unidades de N a inicios del estado reproductivo, en diferenciación del primordio floral; d) Control de malezas: Se realizó un control químico de post-emergencia temprana y otro de post-emergencia tardía. Las malezas presentes fueron principalmente *Echinochloa spp.* (hualcacho), *Alisma plantago-aquatica* (hualtata) y *Alisma lanceolatum* (hualtata), y de acuerdo al estado fenológico de éstas, siguiendo las instrucciones del fabricante. Las moléculas que se ocuparon fueron variando con el paso del tiempo, sin embargo, se pueden nombrar algunas como por ejemplo, Penoxsulam para el control de hualcacho y hualtata, Bentazón para el control de hualtata; Quinclorac y Cihalofof butil ester para controlar hualcacho; e) Manejo de la lámina de agua: previo a la siembra los cuadros fueron inundados con una lámina de agua baja, de 3 a 5 cm, luego se subió el nivel del agua de acuerdo al estado de desarrollo del cultivo, llegando a 20 y 25 cm. aproximadamente, en período reproductivo. Se cortó el agua cuando el cultivo llegó a su madurez fisiológica, finalmente, se cosechó con una humedad de grano entre un 18 y 20%.

Análisis estadístico

Para el análisis de los datos se utilizaron dos metodologías:

Metodología 1.

La base de datos analizada correspondió a los ensayos regionales realizados a partir del año 1994 hasta el año 2014, con excepción de los años 1995 y 1996 donde no hubo datos, por lo cual esos años no fueron considerados. La base de datos presentó algunos

desbalances debido a que durante todos los años hubo líneas que dejaron de evaluarse por sus características deficientes y otras nuevas que fueron introducidas para ser evaluadas. Por otra parte, las localidades que participaron en el programa de mejoramiento genético también fueron distintas a lo largo del período analizado.

En este caso, se ajustó un modelo lineal mixto (MLM) utilizando el software estadístico Infostat (Balzarini *et al.*, 2013) con efectos fijos de año, localidad dentro de año, líneas avanzadas, y la interacción del año con las líneas avanzadas (M. Balzarini, comunicación personal, 27 de enero de 2015). Con este modelo se obtuvieron las medias ajustadas (medias de mínimos cuadrados) de las líneas avanzadas para cada año. Con las medias predichas de las líneas evaluadas cada año se ajustó una regresión lineal simple contemplando la posible falta de homogeneidad de varianzas a través de los años. La variable fenotípica utilizada fue rendimiento en grano por hectárea (base 15% de humedad) con sus respectivas medias genotípicas.

Metodología 2

Se empleó la misma base de datos de la metodología 1. El procedimiento utilizado para el análisis estadístico fue el siguiente: Primero; se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) a los genotipos incluidos en cada ensayo regional para determinar el coeficiente de variación (CV). A partir de esta información, sólo se seleccionaron aquellos ensayos que tuvieron un CV igual o inferior a un 20%, siguiendo las recomendaciones sugeridas por Breseghello *et al.* (1998). Posteriormente, para evitar colinealidad de las matrices utilizadas en el cálculo de avance genético, se estimó la tasa de sustitución de líneas año a año, tomando como criterio mínimo de inclusión del ensayo en el análisis un 20% de sustitución de las líneas experimentales, es decir, el año en que la tasa de sustitución de líneas era menor a un 20%, se eliminó el ensayo del análisis (Cuadro 1). Se impuso esta restricción en el análisis debido a que en el caso de existir colinealidad de los datos, la ganancia genética podría ser subestimada. Los ensayos por año excluidos en la estimación del avance genético fueron los siguientes: 1994, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2006, 2007 y 2010. (Cuadro 1).

Cuadro 1. Criterios de selección de los ensayos y líneas experimentales a evaluar, según tasa de sustitución y coeficiente de variación.

Año	Sustitución (%)		Coeficiente Variación (%)	
1994	11,76	*	27,54	**
1995	si		s.i	
1996	si		s.i	
1997	11,76	*	21,43	**
1998	47,06		31,58	**
1999	52,94		29,23	**
2000	70,59		26,32	**
2001	50,00		39,74	**
2002	55,56		23,38	**
2003	50,00		25,33	**
2004	52,94		24,05	**
2005	29,41		1,25	
2006	55,56		21,18	**
2007	50,00		24,32	**
2008	44,44		10,71	
2009	50,00		13,33	
2010	60,00		25,97	**
2011	64,29		13,19	
2012	57,14		9,62	
2013	50,00		17,44	
2014	56,25		10,34	

s.i: sin información; * tasa de sustitución menor a 20%; ** coeficiente de variación (CV) mayor a 20%.

Fuente: Elaborado por el autor.

Igual que en la metodología 1, para el análisis estadístico se utilizó el ajuste de un modelo lineal mixto (MLM), con efectos fijos de año, localidad dentro de año, líneas avanzadas, y la interacción del año con las líneas avanzadas. Con este modelo se obtuvieron las medias ajustadas de las líneas avanzadas para cada año. Con las medias de las líneas evaluadas para cada año se ajustó una regresión lineal simple contemplando la posible falta de homogeneidad de varianzas a través de los años (M. Balzarini, comunicación personal, 27 de enero de 2015). La variable fenotípica utilizada fue rendimiento por hectárea (base 15% de humedad) con sus respectivas medias genotípicas. El software estadístico utilizado para el análisis Infostat (Balzarini *et al.*, 2013).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presenta un cuadro resumen con las principales características que representan a cada una de las metodologías empleadas en este estudio.

Cuadro 2. Comparación de las metodologías 1 y 2.

Variables	Metodología 1	Metodología 2
Años de ensayos	1994 a 2014, con excepción a 1996 y 1996	Se analizaron los años 2005, 2008, 2009, 2011, 2012, 2013 y 2014.
Tasa de sustitución	No considerada, se analizaron todos los ensayos sembrados en el período.	Se consideraron para el análisis los años con una tasa de sustitución mayor a 20 por ciento.
Coeficiente de variación (CV)	No considerado, se analizaron todos los ensayos sembrados en el período.	Se consideraron sólo los ensayos con un CV igual o menor a 20.
Modelo estadístico	Modelo lineal mixto (MLM) con efectos fijos de año, localidad	MLM con efectos fijos de año, localidad dentro de año, líneas avanzadas, y la

	dentro de año, líneas avanzadas, y la interacción del año con las líneas avanzadas	interacción del año con las líneas avanzadas.
Avance genético basado	Regresión lineal simple	Regresión lineal simple
Restricción	Homogeneidad de varianza.	Homogeneidad de varianza
Variable de respuesta	Rendimiento en grano paddy, con 15 por ciento de humedad.	Rendimiento en grano paddy, con 15 por ciento de humedad.

Fuente: Elaborado por el autor.

Resultados generales, para las metodologías 1 y 2.

Estimación del modelo lineal mixto

Las variables año y líneas experimentales, por sí solas, mostraron diferencias estadísticamente significativas ($P \leq 0,05$), en cuanto a rendimiento por hectárea. De igual modo ocurrió con la variable localidad dentro del año, lo que indicaría que la primera variable (localidad) se comportaría de acuerdo al año en que haya sido evaluada. Asimismo, la interacción de las variables línea experimental por localidad, mostró diferencias estadísticamente significativas, lo que indicaría que la misma línea experimental tuvo un comportamiento distinto y presentó un rendimiento ($t \text{ ha}^{-1}$) diferente dependiendo de la localidad donde fue evaluada. Estos antecedentes pudieron ser corroborados mediante un ANDEVA (cuadro 3) que muestra que la mayor fuente de variación para la variable rendimiento, es el ambiente, con un 76,8%. Por otro lado, la interacción de las variables líneas experimentales por año no mostró diferencias estadísticamente significativas ($P > 0,05$), lo que sería esperable, ya que casi la mitad de las líneas son cambiadas anualmente.

Cuadro 3. Contribución relativa de los efectos genéticos, ambientales y de la interacción genotipo-ambiente respecto a la variabilidad total (no error) del carácter rendimiento.

Año	Componentes de Varianza		
	Ambiental	Genotipo	Interacción Genotipo x Ambiente
1994	87,0	8,0	4,9
1997	94,1	5,9	0,0
1998	87,2	1,3	11,5
1999	95,6	0,8	3,6
2000	95,4	0,8	3,7
2001	93,0	1,0	6,0
2002	92,7	0,0	7,3
2003	93,1	4,1	2,8
2004	100,0	0,0	0,0
2005	100,0	0,0	0,0
2006	98,3	0,0	1,7
2007	73,9	15,5	10,6
2008	23,2	15,0	61,8
2009	61,1	12,7	26,2
2010	55,5	6,9	37,6
2011	55,1	44,9	0,0
2012	11,0	89,0	0,0
2013	42,2	43,1	14,7
2014	100,0	0,0	0,0
Total Promedio	76,8	13,1	10,1

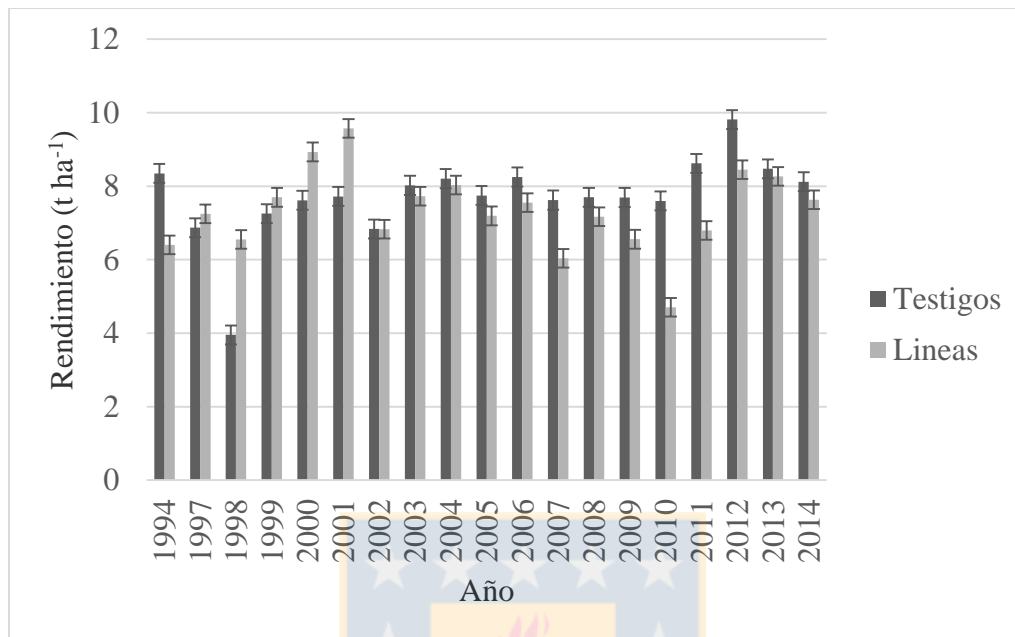
Fuente: Elaborado por el autor.

Metodología 1.

Medias ajustadas.

Las medias ajustadas de la variable rendimiento ($t\ ha^{-1}$) obtenidas de líneas avanzadas entre los años 1994 y 2014, mostraron un rango de variación desde 5,05 a 10,90 $t\ ha^{-1}$; lo cual podría indicar que el programa de mejoramiento genético de arroz fue capaz de generar una baja variabilidad genética ya que los testigos presentaron promedios ajustados similares a las líneas experimentales avanzadas, presentando una variación de 6,41 $t\ ha^{-1}$ en el año 1994 a 1,22 $t\ ha^{-1}$ en el año 2014 (Figura 2).

Figura 2. Rendimiento medio (medias ajustadas) (t ha⁻¹) de las líneas experimentales evaluadas versus los cultivares testigos durante los 21 años analizados en este estudio.

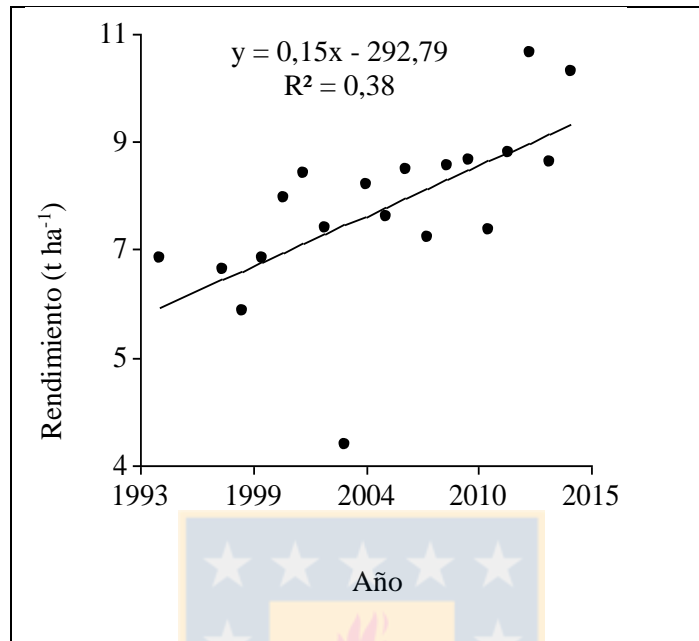


Fuente: Elaborado por el autor.

Ganancia genética

La regresión lineal calculada utilizando las medias ajustadas fue igual a $y=0,15x -292,79$ con un $R^2 =0,38$; lo que indicó un aumento de rendimiento del 15 %, es decir, 150 Kg ha⁻¹ durante 1994 y 2014 (período evaluado) (Figura 3), lo que demostró una ganancia genética de 0,79% por año, muy similar al 0,77% obtenido por Breseghello (1998) en el PMGA de riego, de EMBRAPA, ubicado en el Noreste de Brasil, en un período de cinco años, pero muy por debajo del 2,68% obtenido por Silva (1996) en el PMGA de riego durante un período de once años (1983/84 a 1994/95), en el Estado de Espirito Santo de Brasil.

Figura 3. Regresión lineal de la ganancia genética de las líneas experimentales avanzadas obtenida en un período de 21 años (1994 – 2014), con respecto a la variable rendimiento (t ha⁻¹).



Fuente: Elaborado por el autor.

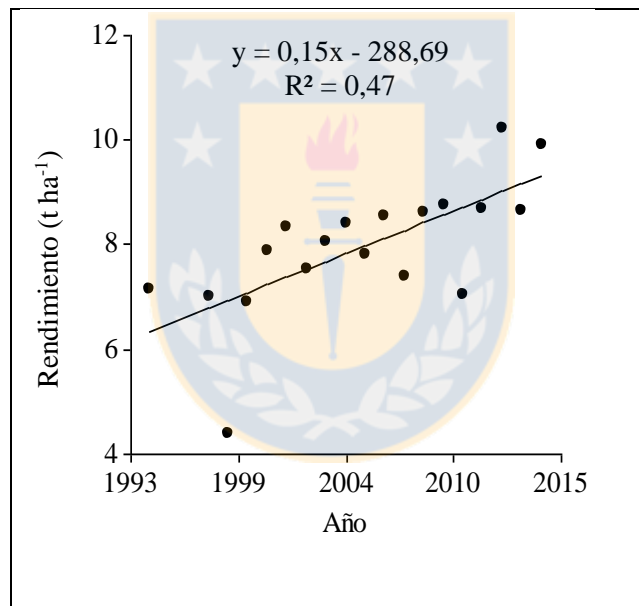
El escaso avance genético estimado en este período de 21 años y bajo esta metodología, se podría deber a una alta homogeneidad genética entre algunos cultivares y genotipos, ya que los progenitores utilizados en la generación de las variedades comerciales no fueron numerosos. Por ejemplo, las variedades comerciales Diamane-INIA y Ñiquén-INIA, fueron lanzadas al mercado en el año 1979 y desde ahí han participado como progenitores del programa de mejoramiento genético, mediante el método de selección por pedigrí (Aguirre *et al.*, 2005).

Probablemente, también la difícil adaptación del germoplasma exótico a las condiciones chilenas, principalmente por bajas temperaturas y el tipo de grano consumido en el país (largo-ancho), han sido algunos de los factores limitantes para una mayor diversidad genética (Aguirre *et al.*, 2005). Asimismo, es necesario tener en consideración que la selección y eliminación del material no se basa sólo en la producción del grano (Alves,

et al., 1999), si no que influyen también otras variables como precocidad, altura de planta, calidad industrial (porcentaje de grano entero), entre otros.

Por otro lado, igual que las líneas experimentales avanzadas, al ser analizadas junto con los cultivares, también se obtuvo una ganancia genética positiva calculada a través del método de regresión $y=0,15x - 288,69$ con $R^2 = 0,47$; correspondiente a un 15%, en el período estudiado (Figura 4), lo que correspondió a un 0,78% por año, similar al avance genético obtenido por las líneas experimentales generadas por el Programa de Mejoramiento Genético de Arroz del INIA.

Figura 4. Regresión lineal de ganancia genética de líneas avanzadas y los cultivares utilizados como testigos, obtenida en un período de 21 años con respecto a la variable rendimiento ($t\ ha^{-1}$).

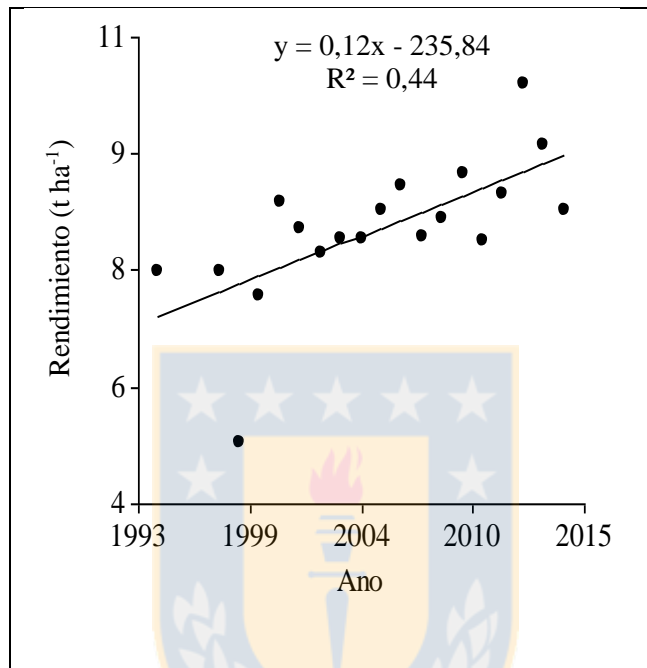


Fuente: Elaborado por el autor.

Si bien, no se utilizaron los mismos testigos anualmente, existió un único cultivar en particular, Diamante-INIA, que sí fue sembrado todos los años. El análisis de regresión de los datos de rendimiento de este cultivar, indicó que $y=0,12x-235,84$ $R^2= 0,44$; obteniendo una ganancia genética de 12% por el período, lo que anualmente

corresponde a 0,63% (Figura 4), igual a la que obtuvieron las líneas avanzadas y los testigos evaluados en conjunto.

Figura 5. Regresión lineal de la ganancia genética del cultivar testigo Diamante-INIA, obtenida en un período de 21 años (1994 – 2014), respecto a la variable rendimiento ($t\ ha^{-1}$).



Fuente: Elaborado por el autor.

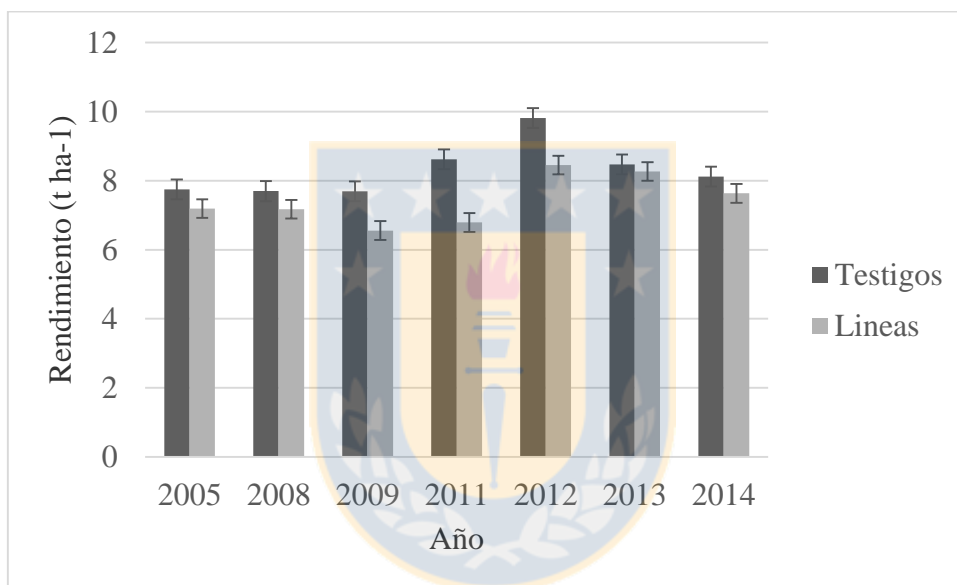
Al considerar el avance genético anual de 0,79% de las líneas avanzadas versus el avance genético que presentó el cultivar testigo Dimante-INIA (0,63%), respecto a la variable rendimiento, se podría inferir que aproximadamente el 20% de la ganancia genética de las líneas avanzadas se debería a mejoramiento genético y un 80% al progreso de las prácticas agronómicas utilizadas en la producción de arroz durante este período.

Metodología 2.

Tasa de sustitución

La tasa de sustitución (Cuadro 1) promedio fue de 48,41%; lo que indicó el dinamismo del programa de mejoramiento genético. Finalmente, luego de las consideraciones anteriormente mencionadas, los ensayos regionales sembrados en los años 2005, 2008, 2009, 2011, 2012, 2013 y 2014 fueron seleccionados para el análisis.

Figura 6. Rendimiento medio (medias ajustadas) (t ha⁻¹) de las líneas evaluadas durante los años 2005, 2009 al 2014.



Fuente: Elaborado por el autor.

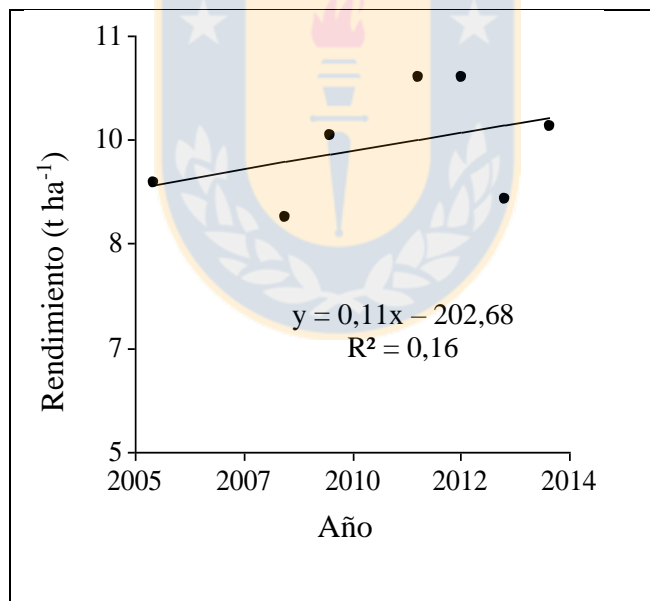
Al igual que cuando se analizaron los resultados de rendimiento de las líneas experimentales en los 21 años, con la metodología 1, hubo un pequeño aumento en rendimiento de las líneas experimentales evaluadas, lo que se vio reflejado en los valores estimados del avance genético. En el caso de los testigos también se observó un aumento en su potencial de rendimiento a partir del año 2011 partiendo de 7,19 t ha⁻¹ en el año 2005 a 7,63 t ha⁻¹ en el año 2014, aunque el año de menor rendimiento fue 2009

con $6,55 \text{ t ha}^{-1}$ el mayor fue de $8,45 \text{ t ha}^{-1}$ en el año 2012 (Figura 6), lo que se podría explicar por un mejoramiento de las prácticas culturales aplicadas a los ensayos.

Ganancia genética

La regresión lineal, para las líneas experimentales avanzadas, fue igual a $y = 0,11x - 202,68$ con $R^2 0,16$; es decir, un aumento de rendimiento del 11% (120 Kg ha^{-1}) durante los siete años analizados (2005, 2008, 2009, 2011, 2012, 2013 y 2014), lo que representó una ganancia genética anual de 1,57% (Figura 7). Estos valores son levemente superiores al 1,35% obtenido por Abbud (1991) en arroz de secano, del Estado de Paraná, en Brasil y al 1,44% obtenido por Breseghello *et al.* (2011) en un período de ocho años (2002 al 2009).

Figura 7. Regresión lineal de la ganancia genética obtenida en los años 2005, 2008, 2009, 2011, 2012, 2013 y 2014, con respecto a la variable rendimiento (t ha^{-1}).

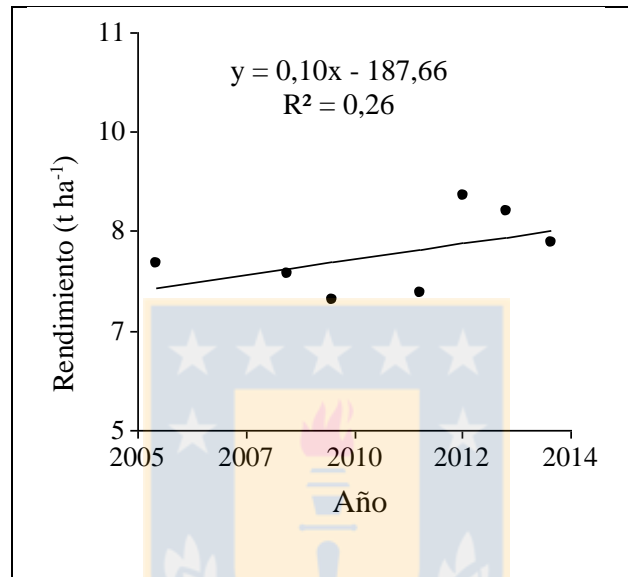


Fuente: Elaborado por el autor.

Por otro lado, igual que en la metodología 1, se analizó el avance genético para las líneas experimentales avanzadas en conjunto con los cultivares testigos. Se obtuvo una ganancia genética positiva calculada a través del método de regresión $y=0,10x-187,66$

con R^2 0,26; correspondiente a un 10% en el período estudiado (Figura 8), siendo un 1,43% por año, levemente inferior al avance genético obtenido por las líneas experimentales generadas por el Programa de Mejoramiento Genético de Arroz del INIA.

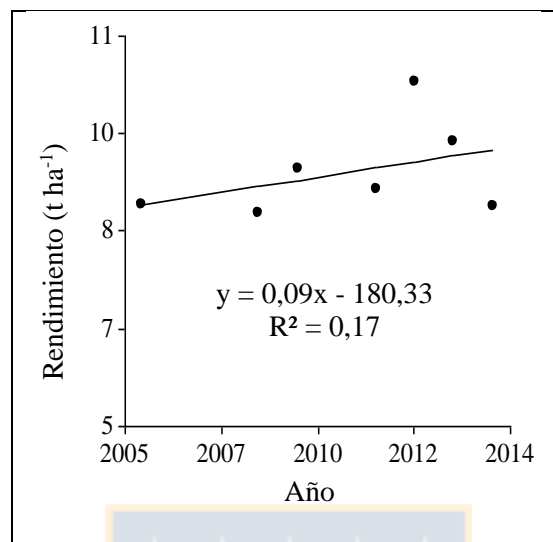
Figura 8. Regresión lineal de la ganancia genética de líneas avanzadas y cultivares utilizados como testigos, en los años 2005, 2008, 2009, 2011, 2012, 2013 y 2014, con respecto a la variable rendimiento ($t\ ha^{-1}$).



Fuente: Elaborado por el autor.

También se evaluó la ganancia genética obtenida por Diamante-INIA, cultivar que ha participado como testigo todos los años en el período evaluado, y dio como resultado una ganancia genética de 9% correspondiente al 1,29% anual, $y=0,09x - 180,33$ con $R^2=0,17$ (Figura 9). De lo anterior, se podría inferir que la ganancia genética de las líneas avanzadas corresponde a un 18% del total y el 82% restante podría atribuirse al adelanto que ha existido en tecnología y ha repercutido en el manejo agronómico del arroz.

Figura 9. Regresión lineal de la ganancia genética del cultivar testigo Diamante-INIA, obtenida en un período de 7 años (2005, 2008, 2009, 2011 – 2014), respecto a la variable rendimiento (t ha⁻¹).



Fuente: Elaborado por el autor.

La diferencia en los resultados de ambas metodologías, obteniendo un mayor avance genético con el procedimiento número dos, se debe a que con esta metodología se analizaron sólo los ensayos en los años que presentaron un coeficiente de variación (CV) menor a 20% y con una tasa de sustitución de las líneas experimentales avanzadas mayor a 20%. El uso de ensayos con un menor coeficiente de variación permitió evaluar las líneas experimentales incluídas en los ensayos con mejor precisión experimental; y por otro lado, la tasa de sustitución elegida habría evitado o disminuido la colinealidad de los datos. Situación similar a la planteada por Atroch y de Sousa (2000) cuando evaluaron ganancia genética en arroz inundado del Estado de Amapa, en Brasil, con resultados de avances genéticos de 3,02 % y 2,45%; comparando las metodologías de ganancia genética en trigo, de los autores Fernandes (1988) y Vencovsky *et al.* (1986); donde el primer análisis no consideró los genotipos que son comunes de un año a otro. Asimismo, Fernández y Frazon (1997) plantearon que la ganancia genética es menor cuando los genotipos comunes participan en el análisis de datos.

PERSPECTIVAS FUTURAS

El avance genético del PMGA del INIA es similar al obtenido en otros programas internacionales y además se podría mejorar ampliando la base genética utilizada por el programa, y explorando la posibilidad de complementar el método de mejoramiento genético de Pedigrí utilizado, con otros métodos como la selección recurrente y la utilización de herramientas biotecnológicas que permitan mejorar su eficiencia.

CONCLUSIONES

El avance genético estimado utilizando la metodología 1 correspondiente al análisis de los 21 años, fue de 0,73% anual, comparado con el estimado utilizando la metodología 2, donde se analizaron 7 años solamente, fue de 1,14% anual.

El avance genético estimado en el PMGA del país es similar, a los obtenidos en otros programas internacionales de mejoramiento genético en arroz.

El aumento de rendimiento promedio nacional de arroz en Chile, se debe principalmente al avance tecnológico en el manejo del cultivo y en menor medida al mejoramiento genético.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo del Programa de Mejoramiento Genético de Arroz de INIA, proyecto FONDEF, código D10I1183 y a la comisión asesora de tesis conformada por profesionales de INIA y de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Concepción. Chillán. Chile.

LITERATURA CITADA

Abbud, N.S. 1991. Melhoramento genético do arroz (*Oryza sativa* L.) no Estado do Paraná de 1975 a 1989. Piracicaba: ESALQ, 141p. Tese de Doutorado.

Aguirre, C., Alvarado, R. y Hinrichsen, P. 2005. Identificación de cultivares y líneas de mejoramiento de arroz de Chile mediante amplificación de fragmentos polimórficos (AFLP). *Agric. Tec.* 65 (4): 356 – 369.

Alves, A., Guimaraes, P., de Moraes, O., Soares, P., de Sousa, T. y Alves, M. 1999. Progreso genético obtenido pelo melhoramento do arroz de sequeiro em 21 anos de pesquisa em Minas Gerais. *Pesq. Agropec. Bras.* 34(3): 415-424.

Annicchiarico, P. 2002. Genotype x environment interaction. Challenges and opportunities for plant breeding and cultivar recommendations. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Roma, Italia. 115p.

Anowara, A., Hassan, J., Kulsum, U., Islam, M.R., Hossain, K. and Rahman, M. 2014. AMMI biplot analysis for stability of grain yield in hybrid rice (*Oryza sativa* L.) *Rice Research* 2(2): 126.

Atroch, A., e de Sousa, G. 2000. Progreso genético em arroz de Várzea Úmida no estado do Amapá. *Pesq. Agropec. Bras.* 35(4): 767-771.

Atroch, A., Peixoto de Moraes, O., Nakano, H.P.R. e Da Maria de Castro, E. 1999. Progreso do melhoramento genético do arroz de sequeiro no estado do Amapá. *Pesq. Agropec. Bras.* 34(9): 1623-1632.

Balzarini, M. y Di Rienzo, J. *InfoGen*. 2013. FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. <<http://www.info-gen.com.ar>>. [Consulta: 9 diciembre 2013].

Breseghele, F., Peixoto de Moraes, O., and Nakano, P. 1998. A new method to estimate genetic gain in annual crops. *Genet. Mol. Biol.* 21 (4): 1678-4685.

Breseghele, F., Peixoto de Moraes, O., Valle, P., Simoes, A., da Maia, E., Perpétuo, E., Pereira, A., Almeida, J., de Matos, A., Marico, M. and Pereira, J. 2011. Results of 25 years of upland rice breeding in Brasil. *Crop Sci.* 51: 914-923.

Cargnin, A., Alves, M., Fronza, V., and Martellet, C. 2009. Genetic and environmental contributions to increased wheat yield in Minas Gerais, Brazilian. *Sci. Agric.* 66(3): 317-322.

Cox, T.S., Shroyer, J.P., Ben-Hui, L., Sears, R.G., and Martin, T.J. 1988. Genetic improvement in agronomic traits of Hard Red Winter wheat cultivars from 1919 to 1987. *Crop Sci.* 28:756-760.

Donmez, E., Sears, R.G., Shroyer, J.P., and Paulsen, G.M. 2001. Genetic gain yield attributes of winter wheat in the Great Plains. *Crop Sci.* 41:1412-1419.

Donoso, G., Paredes, M., Becerra, V., Arrepol, C. and Balzarini, M. 2015. GGE biplot analysis of multi-environment yield trials of rice produced in a temperate climate. *Chilean Jar.* 76(2): 152-157.

DoVale, J.C., Soares, P.C., Cornélio, V.M.O., Souza Reis, M., Borges, V., Bisi, R.B., Soares, A.A., e Fritsche-Neto, R. 2012. Contribucao genetica no produtividade do arroz irrigado em Minas Gerais no período de 1998 a 2010. *Bragantia*, 71 (4): 460-466.

Duvick, D. 2005. The contribution of breeding to yield advances in maize (*Zea mays* L.). *Adv. in Agron.* 86: 83-145.

Egli, D. 2008. Comparison of corn and soybean yields in the United States: historical trends and future prospects. *Agron. J.* 100: 79-88.

Engler, A. and del Pozo, A. 2013. Assessing long - and short – term trends in cereal yields: the case of Chile between 1929 y 2009. *Ciencia. Inv. Agr.* 40 (1): 55-67.

Fernandes, J. S. C. 1988. Estabilidade ambiental e de cultivares de milho (*Zea mays* L.) na regioao centro sul do Brasil. Tese. Universidad de Sao Paulo. Brasil. Piracicaba. 104 p.

Fernandes, J. S. C. and Frazon, J. F. 1997. Thirty years of genetic progress in maize (*Zea mays* L.) in a tropical environment. *Maydica*, Bergamo 42: 21-27.

Farshadfar, El, Mohammadi, R., Aghaee, M., and Vaisi, Z. 2012. GGE biplot analysis of genotype x environment interaction in wheat-barley disomic addition lines. *Aust. J. Crop Sci.* 6 (6): 1074-1079.

Gilmour AR, Gogel BJ, Cullis BR, and Thompson R. 2009. ASReml user guide v. 3.0. VSN International Ltd, Hemel Hempstead.

Graybosch, R.A. and Peterson, C.J. 2010. Genetic improvement in winter wheat yields in the Great Plains of North America, 1959-2008. *Crop Sci.* 50: 1882-1890.

Hucl, P. and Baker, R.J. 1987. A study of ancestral and modern Canadian spring wheats. *Can. J. Plant Sci.* 67:87-97.

Jiang, H., Guo, L-B., and Qian, Q. 2007. Recent Progress on rice genetic in China. *J. Integr. Pl. Biol.* 49(6):776-790.

Kandus, M.D.; Almorza, D.; Ronceros, R.B., and Salerno, J.C. 2010. Statistical models for evaluating the genotype-environment interaction in maize (*Zea mays* L.) *ØYTON* 79: 39-46.

Malosetti, M., Ribaut, J-M., and van Eeuwijk, F. A. 2013. The statistical analysis of multi-environment data: modeling genotype-by-environment interaction and its genetic basis. *Front. Physiol.* 4:44.

Menezes J., Ramalho, M., e Abreu, A. 2008. Selecao recorrente para tres caracteres do feijoeiro. *Bragantia.* 67(4): 833-838.

Nakano, P.H., Pereira, J.A., Peixoto de Moraes, O, Guimaraes, E.P., e Yokokura, T. 2000. Ganhos na produtividade de grãos pelo melhoramento genético do arroz irrigado no meio-norte do brasil. *Brasileira de Pesquisa Agropecuária* 35(8): 1595-1604.

Perry, M. and D'Antuono, M., 1989. Yield improvement and associated characteristics of some Australian spring wheat cultivars introduced between 1860 and 1982. *Aust. J. Agric. Res.* 40: 457-472.

Rodrigues, O., Lhamby, J.C., Didonet, A.D. and Marchese. J.A.2007. Fifty years of wheat breeding in Southern Brazil: *Pesq. Agropec. Bras.* 42(6):817-825.

Sayre, K.D., Rajaram, S. and Fisher, R.A. 1997. Yield potential progress in short bread wheats in Northern Mexico. *Crop Sci.* 37:36-42.

Silva, A.F. Contribuição do melhoramento genético do arroz irrigado por inundação para rendimento de grãos, no período de 1983/84 a 1994/95, no Estado do Espírito Santo. Lavras: UFLA, 1996. 108p. Tese de Doutorado.

Tabien, R.E., Samonte, S.O.PB, and McClung, A.M. 2008. Forty-eight years of rice improvement in Texas since the release of cultivar Bluebonnet in 1944. *Crop Sci.* 48:2097-2106.

Tweeten, L., and Thompson S.R. 2008. Long-term agricultural output supply-demand balance and real farm and food prices. Working Paper AEDE-WP 0044-08, Ohio State University, Columbus, OH.

Vencovsky, R., Morais, A.R.; García, J.C.; e Teixeira, N.M. 1986. Progreso genético em vinte anos de melhoramento de milho no Brasil. In: Congreso Nacional de Milho e Sorgo, 1986, Sete Lagoas. Anais. Embrapa-CNPMS, Sete Lagoas, pp. 300-306.

Waddington, S.R., Ransom, J.K., Osmanzai, M., and Saunders, D.A. 1986. Improvement in the yield potential of bread wheat adapted to northwest Mexico. *Crop Sci.* 26(4): 698-703.

Yan, W. and Hunt L.1996. Genotype by environment interaction and crop yield. *Plant Breed. Rev.*16:135-178.

