

ANALISIS DE UN ENSAYO DE LARGA DURACIÓN CON MODELOS MIXTOS



Estación Experimental Agropecuaria
Marcos Juárez

Beatriz MASIERO, Carlos GALARZA y María Belén CONDE

EEA INTA Marcos Juárez

bmasiero@mjuarez.inta.gov.ar

RESUMEN

Los ensayos de larga duración abordan una problemática cada vez más común en agricultura, su objetivo es medir efectos acumulados en el tiempo de, por ejemplo, varias prácticas de manejo sobre distintas rotaciones de cultivos. Si bien cada ensayo tiene sus propias características, se pueden señalar algunas generalidades tanto en diseño como en el análisis de la variable rendimiento de los cultivos. Respecto al diseño son de gran utilidad los que contemplan la presencia de todas las fases de las rotaciones todos los años. En cuanto al análisis los modelos mixtos proveen de herramientas flexibles para el tratamiento de los problemas específicos. El objetivo de este trabajo es presentar el diseño y análisis de un ensayo de larga duración realizado en la EEA INTA Marcos Juárez, mostrando distintas alternativas y decisiones que se fueron tomando en cada etapa.

Palabras clave: ensayos de larga duración, rotación, modelos mixtos

INTRODUCCIÓN

Los ensayos de larga duración (ELD) son apropiados para medir efectos acumulados en el tiempo sobre distintos tipos de variables respuesta, tomadas tanto sobre el suelo (propiedades químicas y físicas) como sobre los cultivos (rendimiento), estas medidas pueden ser tomadas anualmente o en frecuencias menores o mayores, a intervalos regulares o irregulares.

La característica esencial de los ELD es que los tratamientos se asignan a las unidades experimentales al comienzo y se continúan a través de los años siempre en las mismas parcelas, pudiendo utilizar cualquier tipo de diseño básico (bloques completos, bloques incompletos, parcelas divididas, etc.)

De particular interés suelen ser los ensayos en que se comparan distintas rotaciones o sistemas de manejo con prácticas reducidas de labranza o formas de aplicación de agroquímicos.

Un tipo especial de ELD son los ensayos de rotación de cultivos, donde cada posible inicio de la rotación puede incluirse en el diseño asegurando que cada cultivo participante esté presente cada año (Yates 1954).

Los ensayos con rotación de cultivos en que se considera la variable rendimiento presentan la dificultad de analizar distintos cultivos simultáneamente debido a que sus producciones no

son comparables. Distintos autores han propuesto soluciones para este problema (Patterson 1964). Una alternativa es usar variables unificadoras, por ejemplo reducir todos los rendimientos a valor económico, que resulta común a todos los cultivos, o usar rendimientos relativos a un máximo dado dentro de cada cultivo, pero se tiene el inconveniente de una compleja interpretación. Otra alternativa es analizar por separado los rendimientos de cada cultivo ya que los efectos de cada rotación varían considerablemente de cultivo a cultivo. Otro inconveniente de los ELD es que es difícil sostener el supuesto de homogeneidad de variancias e independencia entre períodos o años.

En cuanto a los modelos para el análisis de los ELD hay varias maneras propuestas en la literatura para tener en cuenta la correlación en el tiempo. Por un lado se usaron medidas resumen las cuales fueron analizadas a la manera tradicional, pero esta modalidad presenta el inconveniente de perder mucha información. Otro método más elaborado es a través de manova usando cada medida en el tiempo como una variable y una tercera modalidad es usar el análisis de medidas repetidas como un modelo de parcelas divididas en el tiempo. Todas estas modalidades tienen limitaciones para abordar los datos faltantes y la heterogeneidad de variancias.

Actualmente existe consenso que para analizar medidas repetidas lo más adecuado son los modelos mixtos, los cuáles proveen un marco flexible para el tratamiento de distintas estructuras de covariancia, incluyendo heterogeneidad de variancias sin correlación (banded), que son más parsimoniosos que los métodos nombrados anteriormente y permiten trabajar con datos faltantes (Loughin 2006).

Cada ensayo de larga duración tiene sus particularidades y en consecuencia sus propios problemas que requieren su propio análisis.

En la estación experimental del INTA de Marcos Juárez se conducen desde hace más de 30 años varios ensayos de larga duración en los que se comparan rotaciones y prácticas de manejo, en especial sobre la problemática de la siembra directa (SD).

El objetivo de este trabajo es mostrar el uso del diseño de un ensayo de larga duración comparativo de tratamientos de labranza y fertilización y la aplicación de modelos mixtos para su análisis. Se comparan los efectos acumulados de distintas prácticas de manejo y se estima el efecto ambiental de cada año con la finalidad de que no interfiera en la estimación del efecto de tratamientos. A pesar de que se trabaja sobre una rotación, no es un ensayo comparativo de rotaciones, ya que se trata siempre de la misma, consistente en la secuencia maíz, trigo/soja de segunda, soja de primera analizada cultivo por cultivo.

DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

El ELD considerado tiene como principal finalidad el conocimiento del efecto acumulado en el tiempo que tienen distintos sistemas de labranza y fertilización sobre las propiedades física y química del suelo y sobre la productividad de los cultivos (Galarza y otros 2001).

Se estudia una única secuencia de cultivos cuyo ciclo es de 3 años: maíz - trigo/soja de segunda - soja de primera, que se repite en el tiempo. El experimento consta de 3 fases comenzando la secuencia con cada uno de los cultivos, de tal manera que todos los años se tienen parcelas con maíz, con trigo/soja y con soja de primera.

Los tratamientos de interés son 8, consisten en distintos tipos de labranza y fertilización (con y sin) :

AC- Labranza reducida con fertilización.

AS- Labranza reducida, sin fertilización.

BC- SD continua con fertilización uso actual del productor.

BS- SD continua sin fertilización .

CC- SD con fertilización de reposición (repone todos los nutrientes, es mayor a la fertilización de BC).

CS- SD continua sin fertilización.

DC- SD con cultivo de cobertura invernal y fertilización actual del productor.

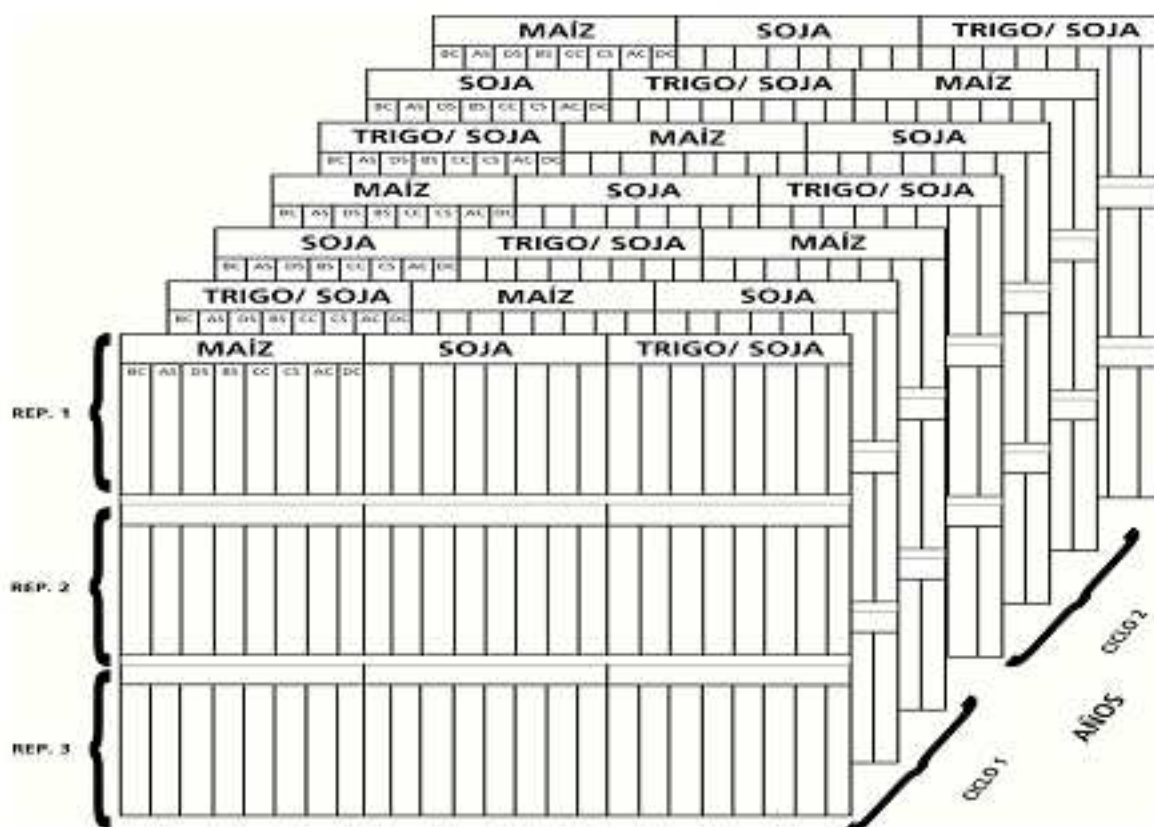
DS- SD continua con cobertura sin fertilización.

Los tratamientos BS y CS se pensaron para diferir en la variedad utilizada pero en la práctica son muy similares.

El ensayo se instaló en 1994 y continúa hasta el presente en las mismas parcelas (14 años) con un diseño en parcelas divididas. En las parcelas principales se colocaron las distintas fases de la rotación, en las subparcelas los tratamientos de labranza y fertilización que no llegan a constituir exactamente un factorial.

El diseño utilizado repite la secuencia en distinta fase, por lo tanto todos los años están presentes todos los cultivos en distintas parcelas, de modo que un cultivo vuelve a caer en la misma parcela 3 años después (figura 1).

Figura 1 - Diseño de campo



ANÁLISIS ESTADÍSTICO

En este trabajo se presenta el análisis estadístico de la variable rendimiento de los 4 cultivos, el cual se realizó separadamente para cada uno (maíz, trigo, soja de primera y soja de segunda). Se utilizan los rendimientos de todos los años tomándolos una vez de cada fase, es decir que se vuelve a la misma parcela con el mismo cultivo cada 3 años.

Se usó el PROC MIXED de SAS. Los códigos SAS se presentan a continuación en términos generales. Se probaron distintas alternativas de modelos con variantes en los siguientes puntos:

- Posibilidad de heterogeneidad de variancias entre años.
- Posibilidad de distintos modelos de correlación entre años. El año fue considerado simultáneamente de 2 maneras, como variable clasificatoria y como covariable, para

- explicar el efecto puntual debido a las condiciones ambientales (clasificatoria AA) y como efecto acumulativo a través del tiempo (covariable ANIO).
- Efecto clasificatorio de años como fijo o aleatorio.
- Estimación por contrastes de las diferencias de pendientes de los tratamientos de interés para el investigador.
- Comparación de medias del efecto de tratamientos mediante la rutina PDMIX (Saxton 1998).

Los códigos SAS utilizados fueron los siguientes:

```
AA=ANIO; *AA es usado como variable clasificatoria y ANIO como
covariable.
proc mixed ratio covtest data=BASE; WHERE Cultivo='Trigo' ;
class REP TRATA AA ;
model REND = AA REP TRATA TRATA*ANIO /DDFM=KR solution ;
repeated / SUB=REP*TRATA TYPE=UN(1) RCORR;

* SD vs labranza reducida ambos fertilizados ;
ESTIMATE 'BC VS AC (LAB)' TRATA*ANIO -1 0 1;
* con vs sin cobertura ambos fertilizados;
ESTIMATE 'DC VS BC (COB)' TRATA*ANIO 0 0 -1 0 0 0 1;
* fertilización de reposición vs la del productor;
ESTIMATE 'CC VS BC (FERT)' TRATA*ANIO 0 0 -1 0 1 ;
*efecto de fertilizar en el tratamiento B;
ESTIMATE 'BC VS BS' TRATA*ANIO 0 0 1 -1 ;
ESTIMATE 'AC VS AS' TRATA*ANIO 1 -1 ;
ESTIMATE 'DC VS DS' TRATA*ANIO 0 0 0 0 0 0 1 -1 ;

lsmeans TRATA /pdiff;
ods output lsmeans=mmm diffs=ppp;
ods listing exclude diffs lsmeans;
run;

%include 'C:/programasas/pdmix800.sas';
%pdmix800(ppp,mmm,alpha=.05,sort=yes);
```

RESULTADOS

Para todos los cultivos el ajuste del modelo, medido a través del criterio de Akaike, mejoró cuando se consideraron variancias heterogéneas entre años. Los modelos de correlación entre años no mejoraron el ajuste respecto a la ausencia de correlación, lo cual resulta lógico ya que en la consideración de un determinado cultivo se vuelve a la misma parcela 3 años después. El efecto clasificatorio de años (AA) se tomó como fijo ya que puede ser de interés comparar los rendimientos en años determinados.

1 -CULTIVO MAIZ

En la figura 2 se representan los rendimientos medios de maíz por tratamiento y año

Figura 2 - Rendimientos de maíz por tratamiento y año.

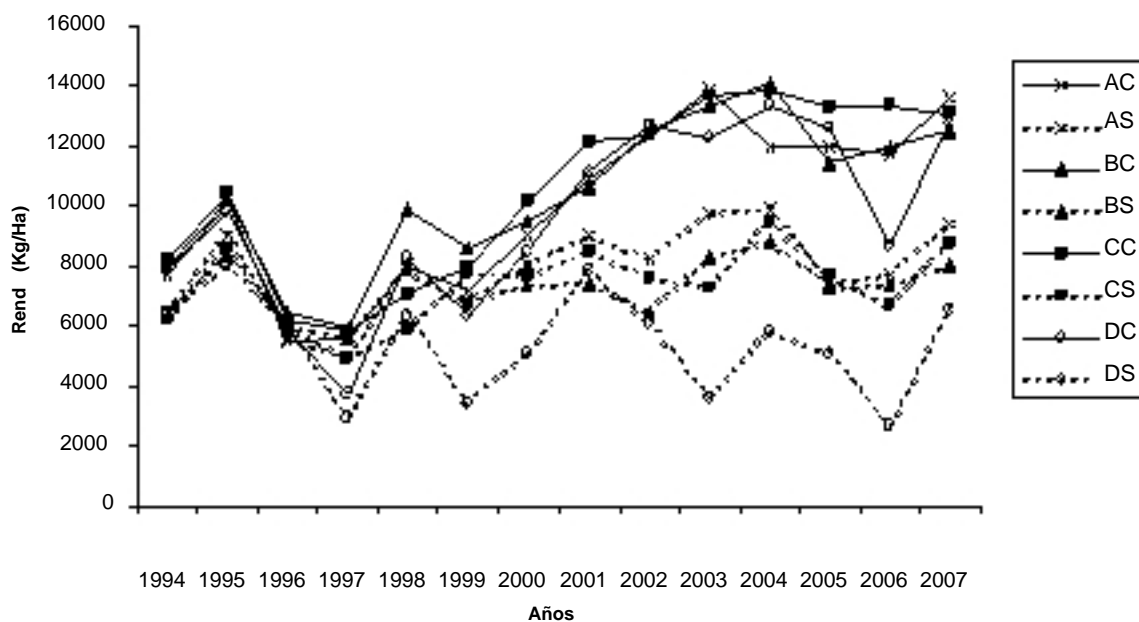


Tabla 1- Análisis de variancia de los rendimientos de maíz.

Tests de tipo 3 de efectos fijos				
Efecto	Num	Den	F-Valor	Pr > F
	DF	DF		
AA	12	94.1	34.22	<.0001
REP	2	212	0.90	0.4085
TRATA	7	103	0.90	0.5133
ANIO*TRATA	7	115	33.34	<.0001

Etiqueta	Estimador	Estimador estándar	Error	Valor t	Pr > t
			DF		
B VS A (LAB) CF	-82.5560	60.3932	116	-1.37	0.1743
D VS B (COB) CF	93.5449	60.3932	116	1.55	0.1241
C VS B (FERT) CF	139.14	60.3932	116	2.30	0.0230
B CF VS B SF	338.81	60.3932	116	5.61	<.0001
A CF VS A SF	350.36	60.3932	116	5.80	<.0001

El efecto tratamiento sobre el rendimiento de maíz no es significativo en el origen (año 1994).

El efecto año resulta significativo como clasificadorio (AA altamente significativo) y también como efecto acumulado diferente entre tratamientos (interacción tratamiento por año) . Por ejemplo, además del efecto puntual de cada año, el tratamiento CC acumula 139,14 Kg/Ha por año más que el tratamiento BC, indicando la ganancia en rendimiento de usar

fertilización de reposición sobre la fertilización que realiza el productor. Por el contrario realizar un cultivo de cobertura no difiere con el transcurso de los años.

2-CULTIVO DE TRIGO

Figura 3 - Rendimientos de trigo por tratamiento y año.

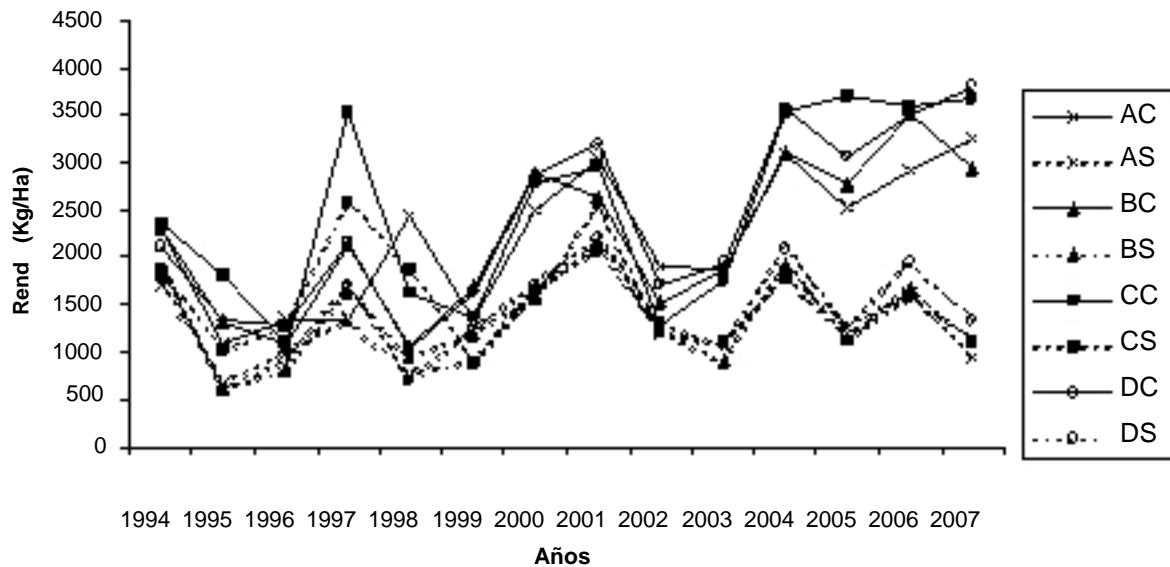


Tabla 2- Análisis de variancia de los rendimientos de trigo.

Tests de tipo 3 de efectos fijos					
Efecto	Num DF	Den DF	F-Valor	Pr > F	
AA	12	91.3	58.44	<.0001	
REP	2	206	2.30	0.1025	
TRATA	7	50.3	1.94	0.0824	
ANIO*TRATA	7	93.4	26.53	<.0001	
Estimadores					
Etiqueta	Estimador	Error estándar	DF	Valor t	Pr > t
B VS A (LAB) CF	5.5829	17.3398	93.2	0.32	0.7482
D VS B (COB) CF	41.3890	17.3398	93.2	2.39	0.0190
C VS B (FERT) CF	21.1767	17.3398	93.2	1.22	0.2251
B CF VS B SF	95.0928	17.3740	93.2	5.47	<.0001
A CF VS A SF	90.6528	17.3398	93.2	5.23	<.0001

Al igual que en el cultivo de maíz no se detecta efecto base de los tratamientos y se detecta efecto año y tratamiento por año. En este caso el efecto de la cobertura acumula 41,39 Kg de trigo por año. Usar el tipo de fertilización de reposición no aumenta los rendimientos a través de los años respecto a la fertilización del productor.

3-CULTIVO DE SOJA DE PRIMERA

Figura 4 - Rendimientos de soja de primera por tratamiento y año.

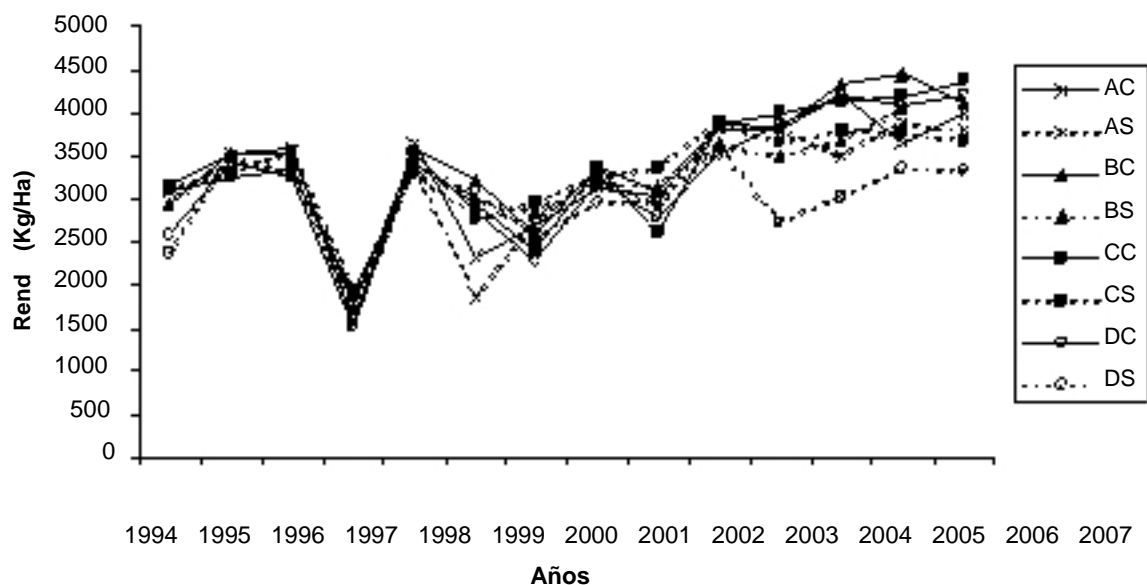


Tabla 3- Análisis de variancia de los rendimientos de soja de primera.

Tests de tipo 3 de efectos fijos						
Efecto	Num	Den	DF	DF	F-Valor	Pr > F
AA		12		99.6	173.66	<.0001
REP		2		142	2.04	0.1335
TRATA		7		104	2.40	0.0254
ANIO*TRATA		7		116	5.47	<.0001
Estimadores						
Etiqueta	Estimador	Error estándar	DF	Valor t	Pr > t	
B VS A (LAB) CF	15.5056	16.0244	116	0.97	0.3352	
D VS B (COB) CF	13.4793	16.0244	116	0.84	0.4020	
C VS B (FERT) CF	9.3646	16.0244	116	0.58	0.5601	
B CF VS B SF	26.5632	16.0244	116	1.66	0.1001	
A CF VS A SF	8.4171	16.0244	116	0.53	0.6004	
D CF VS D SF	80.9014	16.0244	116	5.05	<.0001	
----- Efecto=TRATA Method=LSD(P<.05) Set=1 -----						
Obs	TRATA	Estimador	Error estándar	Letter	Group	
1	BC	3394.16	47.0548	A		

2	CC	3371.04	47.0548	A
3	CS	3304.08	47.0548	AB
4	BS	3279.32	47.0548	AB
5	AC	3276.27	47.0548	AB
6	DC	3223.87	47.0548	B
7	AS	3222.11	47.0548	B
8	DS	2973.01	47.0548	C

En el cultivo de soja de primera se detectan diferencias entre tratamientos en la base más un efecto acumulado de años que no se manifiesta en los primeros 5 contrastes, es decir estos tratamientos tendrían un efecto acumulativo similar, no así el tratamiento DS. En el test de comparaciones de tratamientos se muestran las diferencias en la base (año 1994).

4-CULTIVO DE SOJA DE SEGUNDA

Figura 5 - Rendimientos de soja de segunda por tratamiento y año.

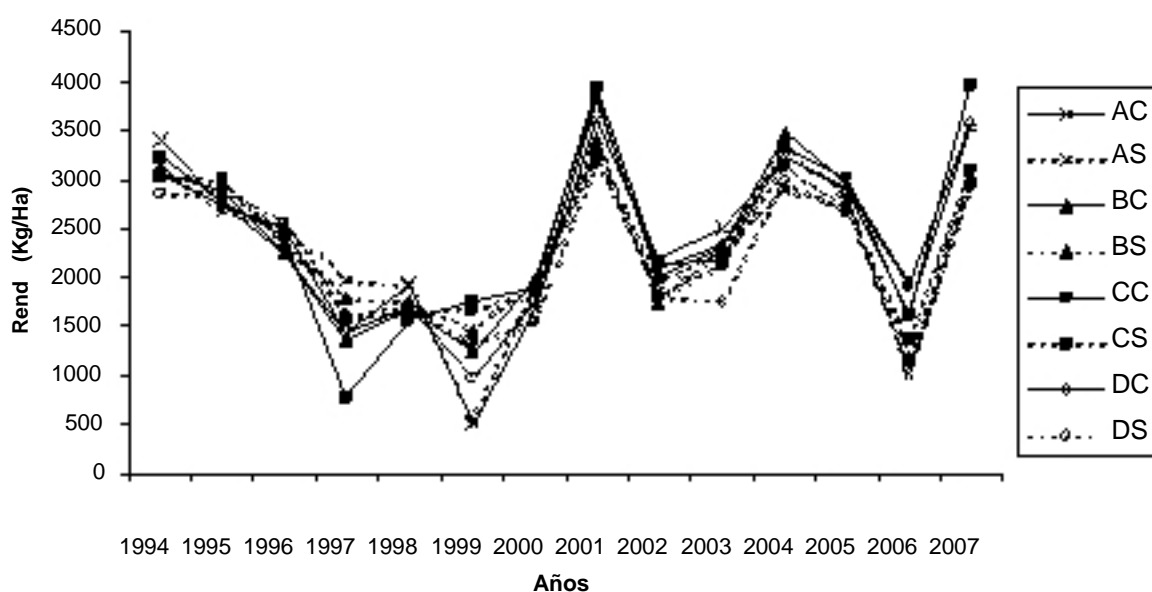


Tabla 4- Análisis de variancia de los rendimientos de soja de segunda.

Tests de tipo 3 de efectos fijos					
Efecto	Num DF	Den DF	F-Valor	Pr > F	
AA	12	101	150.59	<.0001	
REP	2	259	0.90	0.4091	
TRATA	7	104	1.64	0.1330	
ANIO*TRATA	7	157	5.85	<.0001	
Estimadores					
Etiqueta	Estimador	estándar	DF	Error Valor t	Pr > t
B VS A (LAB) CF	23.8702	16.1241	157	1.48	0.1408
D VS B (COB) CF	-13.7853	16.1241	157	-0.85	0.3939
C VS B (FERT) CF	-4.9492	16.1241	157	-0.31	0.7593
B CF VS B SF	48.9952	16.1241	157	3.04	0.0028
A CF VS A SF	43.0210	16.1241	157	2.67	0.0084

No se detecta efecto de tratamientos en la base pero sí un efecto diferencial de acumulación a través del tiempo que sólo se hace evidente en los contrastes que involucran tratamientos con y sin fertilización.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El diseño con todas las fases de la rotación presente todos los años, que se usó en este ensayo, tanto como el uso del tiempo como variable clasificatoria y como covariable, se está aconsejando actualmente como un avance que permite aislar el efecto ambiental de la tendencia acumulada de tratamientos sobre las mismas parcelas, aliviando el confundimiento entre ellos (Loughin 2006).

El uso de variables de rendimiento relativo propuesto en la bibliografía para poder considerar todos los cultivos conjuntamente no resultó atractivo al investigador por su confusa interpretación (resultados no presentados). Por el contrario fue de gran utilidad poder considerar separadamente los 4 cultivos ya que los tratamientos en estudio tuvieron distinto efecto sobre cada uno de ellos, esto fue posible gracias al diseño que contempla la presencia de todas las fases todos los años.

Además de los efectos contemplados en el presente análisis es posible considerar otros como el ciclo y años dentro de ciclo o el efecto aleatorio de los ambientes y sus interacciones. Se planea abordar esas variantes en futuros estudios a realizar sobre este u otros ensayos de larga duración que se conducen en la EEA INTA Marcos Juárez.

REFERENCIAS

BROWNIE C., KING L. and DUBE T.. Longitudinal and Spatial Analyses Applied to Corn Yield Data from a Long-Term Rotation Trial. *NCSU Institute of Statistics Mimeo Series # 2559* (<http://www.stat.ncsu.edu/library/papers/rotations.pdf> consultada el 11/06/08)

GALARZA C., VALLONE P. Y GUDELJ V. (2000). Rotación de cultivos en 3 variaciones de siembra directa continua. Efecto en algunas variables de suelo y el rendimiento. *Información para Extensión N° 62. Maíz resultados Campaña 1999/2000. EEA Marcos Juárez.*

LOUGHIN T. (2006). Improved Experimental Design and Analysis for Long-Term Experiments. *Crop Sci.* 46:2492-2502.

PATTERSON H. (1964). Theory of Cyclic Rotation Experiments. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, Vol. 26, No. 1. (1964), pp. 1-45.

SAS Institute. 2004. SAS 9.1.3 help and documentation. SAS Inst., Cary, NC.

SAXTON A. M. (1998). A macro for converting mean separation output to letter groupings in PROC MIXED. *Proceedings of the Twenty-Third SAS Users Group International Conference, Cary, NC: SAS Institute Inc.* pp. 1243-1246.

YATES F. (1954). The Analysis of Experiments Containing Different Crop Rotations. *Biometrics*, Vol. 10, No. 3. (Sep., 1954), pp. 324-346.