

## ÍNDICE

<b>CARÁTULA</b> .....	1
<b>CERTIFICADO DE APROBACIÓN</b> .....	2
<b>RESUMEN</b> .....	3
<b>SUMMARY</b> .....	4
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	5
Acerca de la empresa .....	7
<b>OBJETIVOS</b> .....	11
<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	12
Ubicación .....	12
Suelo .....	13
Clima .....	14
Diseño de ensayo .....	15
Determinaciones a realizar .....	17
Cronograma de muestreos .....	18
<b>RESULTADOS</b> .....	23
<b>Maíz</b>	
Materia orgánica .....	23
Nitratos .....	25
Bases intercambiables .....	29
Saturación con bases .....	31
Actividad biológica .....	32
Rendimiento .....	34
Calculo de equivalencias nutricionales del digestato .....	39
<b>Soja</b>	
Fósforo .....	42
Capacidad de intercambio catiónico .....	43
Conductividad eléctrica .....	43
Rendimiento .....	44
<b>CONCLUSIONES</b> .....	46
<b>PRESUPUESTO Y FUENTE DE FINANCIAMIENTO</b> .....	47
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	48

UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO  
**FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA**

Informe de Trabajo Final presentado para optar al Grado de Ingeniero  
Agrónomo

Modalidad: Práctica Profesional

**Uso de productos derivados del proceso de digestión anaeróbica.  
Beneficios y oportunidades para la agricultura y el ambiente.**

Alumno: Emanuel Cerrano

DNI: 34311209

Director: Ing. Agr. Marcos Bongiovanni

Tutor Externo: Ing. Agr. Gerardo Andreo

Río Cuarto – Córdoba

16/04/18

UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO  
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA  
CERTIFICADO DE APROBACIÓN

**Uso de productos derivados del proceso de digestión anaeróbica.  
Beneficios y oportunidades para la agricultura y el ambiente.**

Autor: Cerrano, Emanuel José  
DNI: 34311209  
Director: Ing. Agr. Bongiovanni, Marcos

Aprobado y corregido de acuerdo con las sugerencias de la Comisión Evaluadora:

Ing. Agr. Raúl Príncipi \_\_\_\_\_

Ing. Agr. Rosana Marzari \_\_\_\_\_

Ing. Agr. Marcos Bongiovanni \_\_\_\_\_

Fecha de Presentación: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

---

Secretaria Académica

## RESUMEN

Actualmente, el mundo se encuentra en una situación complicada de índole energética y ambiental. Los combustibles tradicionales no solo son contaminantes, sino que son no renovables.

La producción de biogás, a partir de material orgánico y por medio de biodigestores, es una actividad que genera energía limpia, renovable y sustentable. Es un proceso circular donde se reciclan todos los nutrientes utilizados.

En este trabajo se estudio el efecto de la aplicación del digestato (residuo del proceso de fermentación) en el suelo y sobre el rendimiento del cultivo, para así determinar que tanto se reciclan los nutrientes y si se trata de un sistema de agricultura circular.

Se realizaron distintas aplicaciones con dosis crecientes de digestato y se compararon con un testigo y una fertilización típica, utilizando como cultivo maíz con destino cosecha de grano. También se realizó una aplicación en un cultivo de soja.

Luego se realizaron distintos análisis de suelo y observaciones en el cultivo y se analizo la información.

Los resultados mostraron varias ventajas del digestato, desde mejoras de parámetros del suelo hasta incrementos del vigor y rendimiento del cultivo, sin mostrar efectos negativos de algún tipo.

**Palabras clave:** Ambiente, Biogás, digestato, agricultura circular, nutrientes.

## SUMMARY

Currently, the world is in a complicated situation of energetic and environment nature. The conventional fuels not only are contaminants, they are non-renewable.

The production of biogas, from organic matter and through biodigestors, is an activity that generates clean, renewable and self-sustaining energy. It is a circular process in which the used nutrients are recycled.

In this paper it was studied the effect of the application of digestate (residuary of the fermentation process) in the soil and over the yield of a crop, to determinate how much the nutrients are recycled and if is about a system of circular agriculture.

Different applications were made with increasing dose of digestate and they were compared with a witness and a typical fertilization, using corn for chopped as the crop (although the used for this study will remain till harvest). Then several soil's studies and crop observations were made and the information was analyzed.

The results showed several benefits of the digestate, from soil's parameters improvements to increase in the yield and vigor of the crop, without any negative effects.

**Key Words:** Energetic and environmental, Biogas, digestate, circular agriculture, nutrients.

## INTRODUCCIÓN

La situación ambiental actual requiere cada vez más la utilización de alternativas eficientes y amigables con el ambiente, con el objetivo de tender hacia una producción más sustentable que permita también altos niveles productivos pero sin perder en el proceso recursos no renovables y contaminar el medio. Tecnologías limpias como la energía solar, eólica, geotérmica y la producción de biocombustibles están comenzando a tener más atención en un contexto donde el uso de energía fósil como principal fuente de energía comienza a tener más repercusiones en varios aspectos, tanto sociales, económicos, políticos como ambientales.

En este caso se analiza la utilización de digestato como biofertilizante, el cual es un subproducto de la producción de biogás (metano + CO<sub>2</sub> principalmente) a partir del proceso de digestión anaeróbica de productos vegetales y estiércoles de animales, llamados ingestato.

El digestato es el producto remanente luego de que ocurrió la digestión anaeróbica en el reactor del ingestato (Cecchi et al., 1988). Es biológicamente muy estable (a comparación de la materia orgánica propia del ingestato), por lo que no es rápidamente degradado, y tiene un gran valor nutritivo, ya que nutrientes como el nitrógeno y fósforo, entre otros, que se mineralizan en el digestor, pasan a estar disponibles y no se pierden en el proceso (Masse et al., 2007). A su vez, presenta beneficios para la estructuración y agregación del suelo y provee en mayor proporción moléculas recalcitrantes (lignina, cutina, ácidos húmicos), las cuales son bien conocidas como precursoras en el proceso de humificación (D'Imporzano and Adani, 2007, Schievano et al., 2008), es decir, aumento de la materia orgánica del suelo y todos los beneficios que esto conlleva. Otro dato importante del proceso es que el nitrógeno mineralizado se acumula mayormente como amonio (Sorensen and Moller, 2008), siendo este ion muy disponible y absorbible por el cultivo.

Cabe mencionar que esta práctica también puede tener efectos negativos, como por ejemplo una disminución en el nivel de carbono del suelo donde se realice el cultivo debido a que se cosecha toda la planta de maíz para utilizarla como biomasa quedando así pocos restos vegetales que contribuyan a la humificación, entre algunos otros, los cuales igualmente van a ser considerados en este trabajo.

En síntesis, este proyecto se va a orientar en el estudio de este biofertilizante y sus posibles aplicaciones, modificaciones a nivel físico y químico del suelo y respuestas productivas futuras en un cultivo, con el objetivo de identificar aspectos positivos y negativos a fin de concluir si existe la posibilidad de su utilización a campo, teniendo siempre como referencia a los fertilizantes sintéticos y analizando aspectos económicos, políticos y ambientales para ambas situaciones.

El fundamento de este estudio es considerar la posibilidad de reemplazar parcial o totalmente el uso de fertilizantes sintéticos, con el objetivo de disminuir su uso, ya que la producción de estos demanda altos costos y energía fósil, además de que su uso inadecuado se traduce en impactos ambientales graves. Otro objetivo que se persigue al analizar la implementación de estos biofertilizantes es promover la recirculación de nutrientes y evitar que su destino sea contaminar, por ejemplo, una fuente de agua superficial o subterránea, haciendo referencia con esto a la reutilización de estiércol animal de producciones intensivas.

## ACERCA DE LA EMPRESA



Son un grupo de productores agropecuarios comprometidos con el asociativismo, transformando biomasa en energía limpia en origen, a través de un proceso agroindustrial, revolucionando la oferta energética de las comunidades.

### Productos

El producto principal de Bioeléctrica es la energía eléctrica limpia la cual se genera utilizando como combustible **biogás**, obtenido a partir de una digestión anaeróbica de silaje de maíz con desechos pecuarios: biomasa. Los subproductos obtenidos son **biofertilizante** y **energía térmica** en forma de calor.

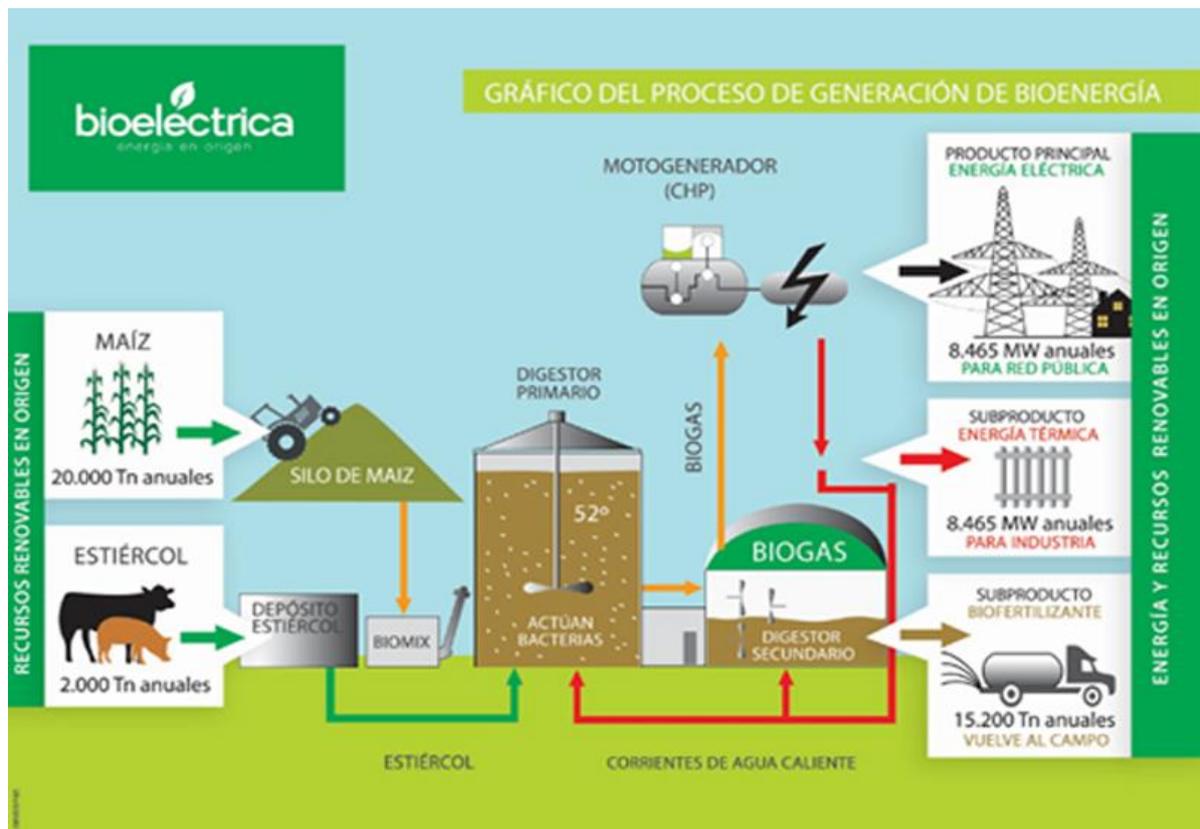
El biofertilizante es utilizado para fertilizar los cultivos y realiza el aporte de nutrientes necesarios para la campaña siguiente. este subproducto se almacena en el biodigestor secundario y/o lagunas hasta su aplicación en los campos.

### Proceso de producción

Las materias primas alimentan a un biodigestor primario donde se lleva a cabo el proceso de digestión anaeróbica a temperatura y agitación constante. Allí los microorganismos degradan la materia orgánica dando lugar a los gases que componen el biogás (principalmente metano y dióxido de carbono) y a un subproducto con alto contenido de nutrientes, como nitrógeno y fósforo, denominado digestato o biofertilizante. Se trata de un proceso termofílico, ya que la temperatura de operación es mayor a 50°C. Posteriormente, la mezcla pasa hacia el biodigestor secundario donde finaliza la degradación de la materia orgánica y se almacenan los productos de la digestión: biogás y biofertilizante. La temperatura de trabajo de este segundo biodigestor es constante.

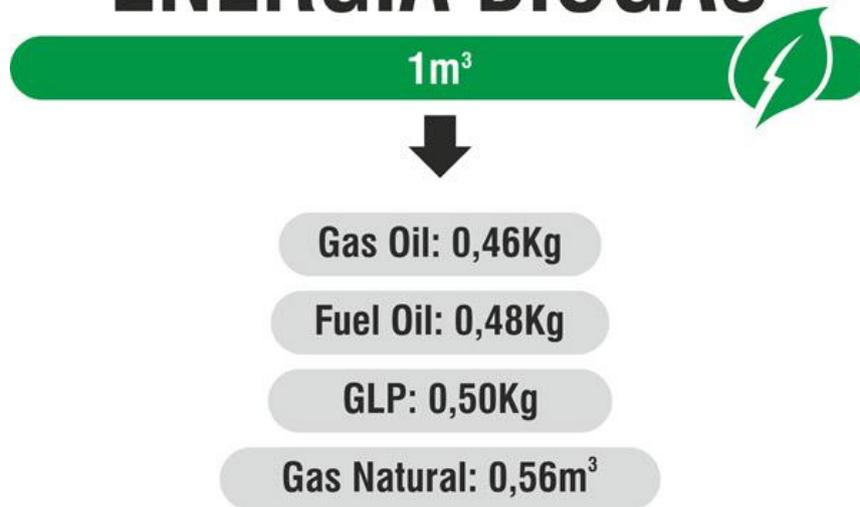
El BIOGAS es una mezcla de gases constituida principalmente por metano (CH<sub>4</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en una proporción que oscila entre un 55% y 65%, de metano. El poder calorífico promedio del biogás está entre 5.500 a 6.000 Kcal m<sup>-3</sup>, dependiendo de la proporción de metano presente en su composición. Su poder calorífico es menor que el del gas natural, pero su producción es renovable. Además, la versatilidad del biogás hace posible la generación de energía descentralizada y a diferente escala, pudiendo suministrar gas o energía eléctrica a hogares utilizando materia orgánica.

El biogás generado requiere de operaciones de purificación para ser alimentado al motogenerador. En primera instancia se eliminan las trazas de sulfuro de hidrógeno (del orden de partes por millón) mediante un proceso químico gracias a la inyección de aire en mínimas cantidades controladas, el oxígeno del aire reacciona con el sulfuro de hidrógeno generando azufre sólido y agua, ambos compuestos se mezclan con los residuos líquidos del biodigestor y forman la mezcla empleada como biofertilizante. A continuación, se elimina el vapor de agua presente mediante su condensado. Por último, el biogás purificado es conducido hacia el área de generación de energía, donde se quema en un motor de combustión interna. La energía térmica liberada se transforma en energía mecánica. Un generador acoplado al motor transforma la energía mecánica en energía eléctrica. Este proceso posee eficiencias superiores al 80%.



Como otros subproductos del proceso se pueden tomar la mejora físico-química que provoca el digestato en el suelo y sus efectos en los cultivos, que puede traducirse en ventajas ambientales y reducción de consumo de insumos externos como agroquímicos y combustibles para el sistema.

# ENERGÍA BIOGÁS

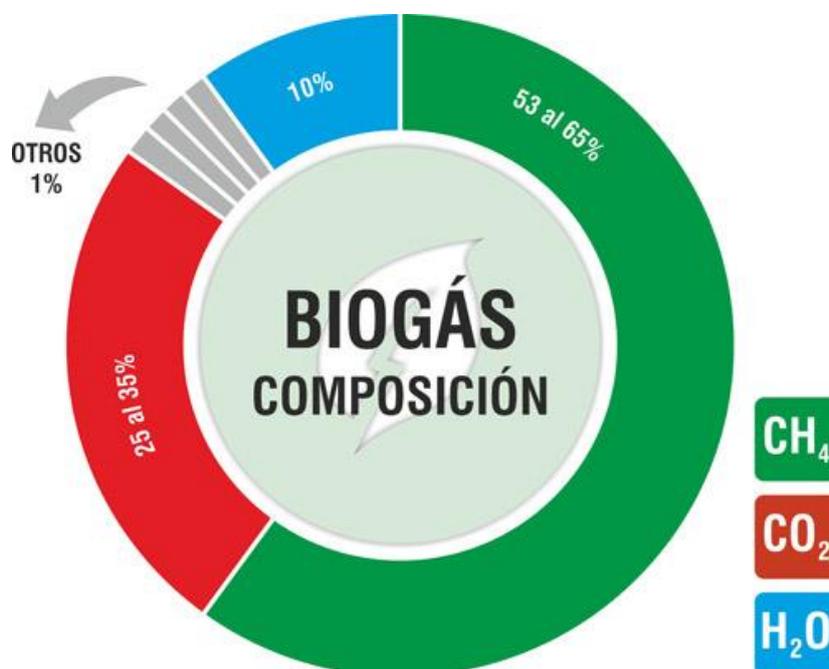


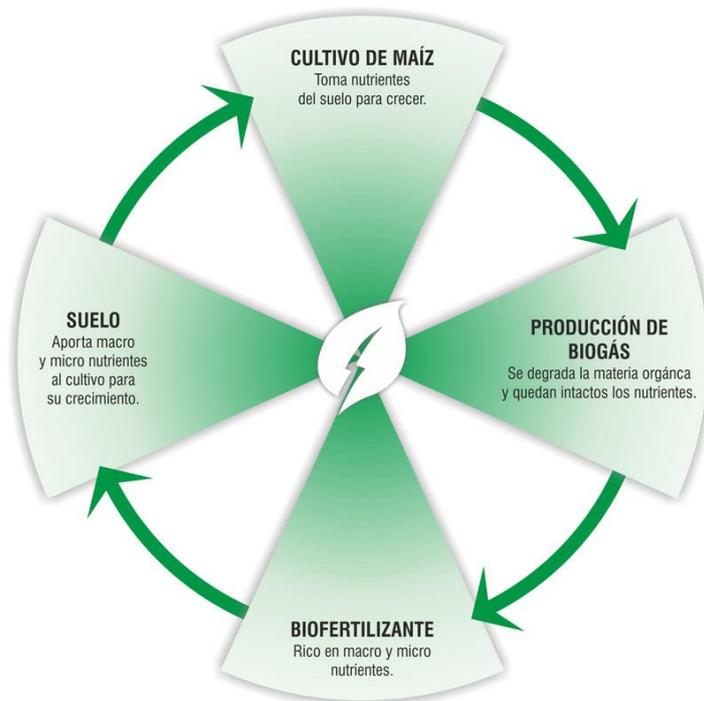
**Producción total biogás planta** = 4380000 m<sup>3</sup> = 2014800 kg Gas Oil = 2452800 m<sup>3</sup> Gas Natural

**1 Tn. ingestato (900 kg silo 100 kg estiércol)** = 199 m<sup>3</sup> biogás = 0.38 MW anual

**Producción de energía eléctrica planta** = 1,2 MW h<sup>-1</sup>.

1 MW = Consumo de 800 hogares





Se trata de un proceso de agricultura circular, debido a que los nutrientes que la planta toma del suelo para crecer quedan intactos en el digestato y son devueltos a la tierra mediante su aplicación como biofertilizante. Esta recirculación de nutrientes, disminuye la dependencia de nutrientes exógenos. Por ejemplo, maíz requiere de 4 Kg de fósforo por cada tonelada de grano producido, en la cosecha 75% del fósforo se va del agro-ecosistema (lote) y debe ser suplido, normalmente por fertilizante sintético o por el suelo en su defecto. El uso del digestato como biofertilizante devuelve al lote los nutrientes que se extrajeron en la cosecha.

De no realizarse esta extracción / reposición del agro-ecosistema, el proceso se asemejaría a una minería.

Además de este beneficio, se suma el hecho de que se le agrega valor al maíz (dinamizador de la economía), al convertirlo en energía y digestato, en lugar de venderlo como un commodity, aprovechando todo el potencial del cultivo.

Otro aspecto positivo es que esta práctica contribuye a la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero (metano y dióxido de carbono) y presenta como ventaja frente a otras energías renovables, como la eólica y la fotovoltaica, que tiene una producción previsible y no satura la red de energía

## **HIPÓTESIS**

La utilización de digestato como biofertilizante tiene efectos positivos tanto sobre el cultivo como el suelo

### **OBJETIVOS GENERALES**

- ❖ Desarrollar la experiencia práctica complementaria a la formación adquirida en los ámbitos formales de enseñanza.
- ❖ Conocer el ámbito en el que se desenvuelven las empresas u organismos públicos o privados relacionados a los estudios realizados en la carrera, permitiendo una preparación y formación futura.
- ❖ Favorecer el conocimiento práctico de las relaciones laborales.
- ❖ Fomentar una serie de instrucciones técnicas que serán de utilidad en la posterior inserción laboral.
- ❖ Evaluar aspectos relacionados con la aplicación de técnicas, desarrollo de propuestas a campo y resolución de problemas con la guía de los tutores.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- ❖ Estudiar la posibilidad de la utilización del biofertilizante en agricultura, a partir del estudio sobre propiedades físico-químicas y químicas y su interacción con el complejo suelo-planta, haciendo énfasis en las propiedades químicas del suelo
- ❖ Comparar resultados productivos del biofertilizante en contraste con fertilizantes sintéticos.
- ❖ Estudiar la reglamentación y normativas vigente acerca del uso de estos productos en el país.
- ❖ Ampliar el conocimiento acerca del uso de estas nuevas tecnologías y los conceptos de sustentabilidad, energía limpia y recursos renovables.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Esta práctica surge de un convenio existente entre la UNRC y la empresa Biomass Crop., y por el interés común de conocer los efectos del digestato en el sistema productivo.

Los ensayos se realizaron en un lote alquilado por la empresa, y se acordó reservar la superficie que abarca a las parcelas para realizar lo planteado en esta práctica.

En la toma de decisiones y manejos a realizar siempre estuvieron presentes el director de este trabajo, el tutor por parte de la empresa y los alumnos.

### Ubicación de la experiencia



Figura 1: Imagen satelital de la zona donde se realizó el ensayo y sus referencias.

Coordenadas 33°11'34.5"S - 64°23'11.7"O.



Figura 2: Foto aérea donde se aprecia el cultivo de maíz dejado en pie para el ensayo

## Datos de lugar de experimentación

### Suelo

El suelo tipo de la zona donde se llevo a cabo la experiencia es un Hapludol típico, franco limoso, moderadamente bien provistos de materia orgánica, moderada capacidad de intercambio. Se corresponden con una secuencia de horizontes A, Bw, BC, C con profundidades del horizonte A entre 20 a 22cm, con 12 a 15 % de arcilla y estructura en bloques subangulares medios moderados.

**Tabla N°1: Descripción del perfil de suelo en estudio.**

Perfil	A1	B	C
Profundidad de la muestra (cm)	0-22	23-51	51 a +
Materia orgánica (%)	2,8		
Relación C/N	8,4		
Arcilla (<2 μ) (%)	10,1	12,5	10,5
Arena (50-1000 μ) (%)	41	37,5	41
Limo (2-20 μ) (%)	10,1	12,5	10,3
pH en H <sub>2</sub> O (1:2,5)	6,7	7,1	7,3

A1: 0-22 cm color pardo oscuro (10YR3/3) en húmedo; franca; estructura en bloques subangulares medios débiles; friable en húmedo; no plástico; no adhesivo; límite inferior claro suave.

B: 22-51 cm color pardo oscuro (10YR3/3) en húmedo; franca a franco limosa; estructura en bloques subangulares medios moderados a débiles; friable en húmedo; no plástico; no adhesivo; barnices finos muy escasos; límite inferior claro suave.

C: 51 cm a +. Color pardo a pardo oscuro (7,5YR4/4) en húmedo; franca; masivo; friable en húmedo; no plástico; no adhesivo. (INTA, 2003)

## Clima

La región de Río Cuarto presenta un clima templado sub-húmedo, con precipitaciones que suelen exceder la evapotranspiración en los meses de primavera y otoño y con déficits puntuales en verano e invierno (Seiler et al., 2010).

Analizando desde un punto de vista global el área, se puede concluir que se está frente a un régimen de precipitaciones irregular tipo monzónico, con un semestre lluvioso (octubre a marzo), que concentra 81-82 % del agua pluvial, y un semestre seco (abril a septiembre), con solo 18-19 % del agua precipitable (INTA, 1994).

La precipitación media anual normal es de 809 mm, con valores extremos mínimos de 405 mm en 2001 y máximos de 1134 mm en 1998. Cabe destacar que la precipitación media normal durante el ciclo del cultivo (septiembre-marzo) es de 685 mm (Seiler et al., 2010). El régimen térmico es meso termal, la temperatura media del mes más cálido (enero) es de 23°C con una máxima absoluta de 39,5°C. La temperatura media del mes más frío (julio) es de 9,1°C con una mínima absoluta de -11,5°C. La amplitud térmica media anual es de 13,9°C. La fecha media de la primera helada es el 25 de mayo y la de última es el 12 de septiembre, siendo el período libre de heladas 255 días en promedio. Los vientos predominantes tienen dirección NE-SO. (Seiler et al., 2010).

Temperatura (Fahrenheit, Celcius)

Precipitación (milímetros)

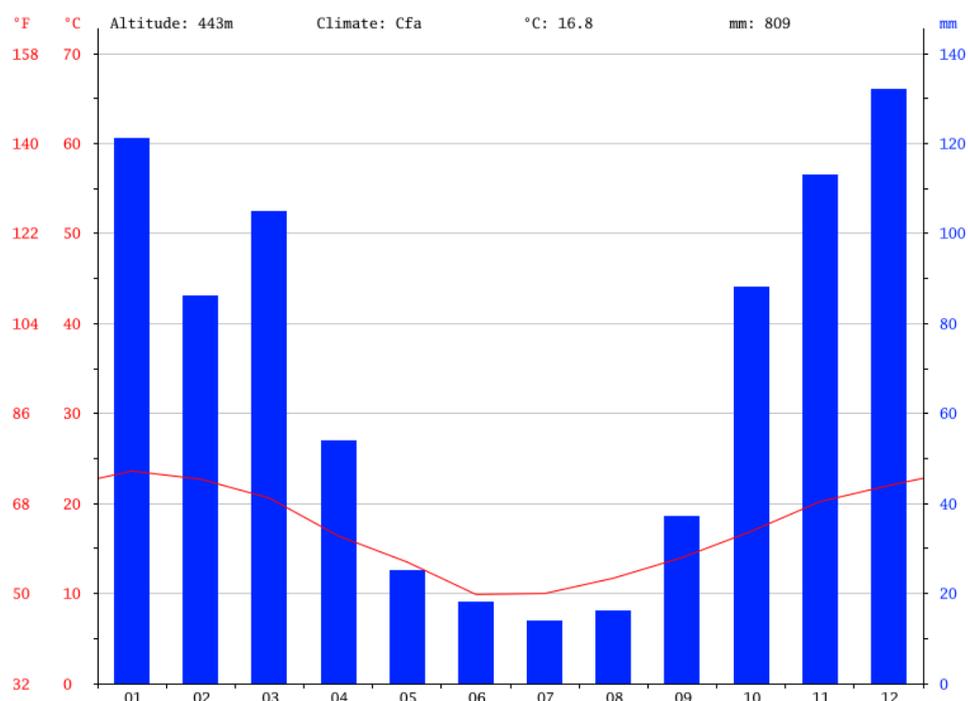


Figura 3: Climograma Río Cuarto

Se utilizará un diseño con macro parcelas apareadas, por duplicado, las cuales van a tener una dimensión de 130 metros de largo x 18 metros de ancho (ancho de labor de la maquinaria).

Se utilizarán dosis crecientes de biofertilizante, resultando en los siguientes tratamientos:

**T1:** 24000 L de digestato lo que hace una dosis de  $100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , un mes antes de la siembra del cultivo de maíz.

**T2:** Testigo sin la aplicación de digestato ni fertilizante

**T3:** 12000 L de digestato lo que hace una dosis de  $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , una semana antes de la siembra.

**T4:** 24000 L de digestato lo que hace una dosis de  $100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , una semana antes de la siembra.

**T5:** 36000 L de digestato lo que hace una dosis de  $150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , una semana antes de la siembra.

Las dosis de los fertilizantes sintéticos usadas fueron aquellas utilizadas generalmente en la zona y para el cultivo específico (maíz), siendo en este caso el tratamiento:

**T6:** fertilización química con 200 kg de una mezcla de fosfato diamónico (40%) y urea (60%).

#### Otros datos técnicos: Maíz

Híbrido	Monsanto Intermedio 190
Fecha de siembra	16/12/15
Densidad de siembra	65000 pl./ha

#### Control químico:

2 kg Atrazina

1.5 lts. Guardian

0.5 lts. Cletodim

1,5 kg Glifosato full 2

1 Tanque = 12 m<sup>3</sup> digestato

(90% silo 10% estiércol cerdo)

Tiempo aplicación = 9 min/parcela

## Siembra cultivo de maíz para picado (16/12/15)



Figura 4: Sembradora utilizada para la siembra del ensayo.



Figura 5: Línea de siembra donde se aprecia el fertilizante sintético aplicado

**Las determinaciones realizadas fueron:**

**A campo:** Determinación de **Densidad aparente (Dap)** por el método del cilindro (en el cual se pesa un volumen de suelo conocido dentro del cilindro para determinar su densidad) y **Constantes hídricas a Capacidad de campo en laboratorio**. Se tomaron de muestras compuestas de 0-20 cm y de 20-40 cm que serán utilizadas para las determinaciones químicas.

**En laboratorio:** A las muestras compuestas se le realizaron las siguientes determinaciones:

- Contenido de materia orgánica por (Walkley Black)
- Nitratos (fenol disulfónico)
- Fósforo disponible (Bray y Kurtz)
- pH actual (1:2,5)
- Conductividad eléctrica (1:1)
- Capacidad de intercambio catiónico y bases de intercambio (Acetato de Amonio pH 7)
- Actividad biológica del suelo (tasa respiratoria).

**Aclaración:** Estas muestras fueron realizadas equitativamente entre los alumnos Emanuel Cerrano y Alejandro Flores, siendo estos los involucrados en esta práctica común y complementaria para ambos. Por ende, las determinaciones y resultados fueron divididos en cada respectiva práctica.

**Cultivo:** En el cultivo se determinó rendimiento de granos por medio de cosecha manual y posterior desgranado a máquina y la relación en peso grano/marlo de todos los tratamientos estudiados, y también rendimiento por la cosecha mecánica del mismo. Luego se compararon los resultados.

## Esquematación y tiempos de muestreo

### Maíz

	Parcela 1 T1	Parcela 2 TESTIGO	Parcela 3 T3	Parcela 4 T4	Parcela 5 T5	Parcela 6 FERTILIZANTE INORGANICO	Soja T3
Aplicación digestato	28/10/15		4/12/15	4/12/15	4/12/15	4/12/15	16/11/15
Primer muestreo	28/10/15	28/10/15	16/12/15	16/12/15	16/12/15	16/12/15	16/12/15
Segundo muestreo	6/11/15	6/11/15	11/2/16	11/2/16	11/2/16	11/2/16	11/2/16
Tercer muestreo	16/12/15	16/12/15	29/8/16	29/8/16	29/8/16	29/8/16	
Cuarto muestreo	11/2/16	11/2/16					
Quinto Muestreo	29/8/16	29/8/16					



Figura 6: Aplicación temprana de parcela 1 (28/11/15) con tratamiento de 2 dosis (24 m<sup>3</sup>)



**Figura 7: Estercolera aplicando el digestato con tubo de descarga libre tipo cola de novia**



**Figura 8: Parcela 1 totalmente aplicada.**



**Figura 9: Detalle de la superficie luego de la aplicación.**



**Figura 10: Vista de las parcelas días después de la aplicación.**

## Aplicaciones de los tratamientos restantes (4/12/15)



**Figura 11: Parcelas 3, 4 y 5 con dosis crecientes de 12, 24 y 36 m<sup>3</sup> de digestato respectivamente.**



**Figura 12: Estado del lote antes de las aplicaciones. Emergencias varias de maíz guacho**



**Figura 13: Parcelas con tratamiento 4 y 5. Se observa el encharcamiento de la parcela con mayor dosis.**

## RESULTADOS

### Determinaciones en el suelo

#### Materia Orgánica



Figura 14: Parte del método para determinar contenido de materia orgánica.

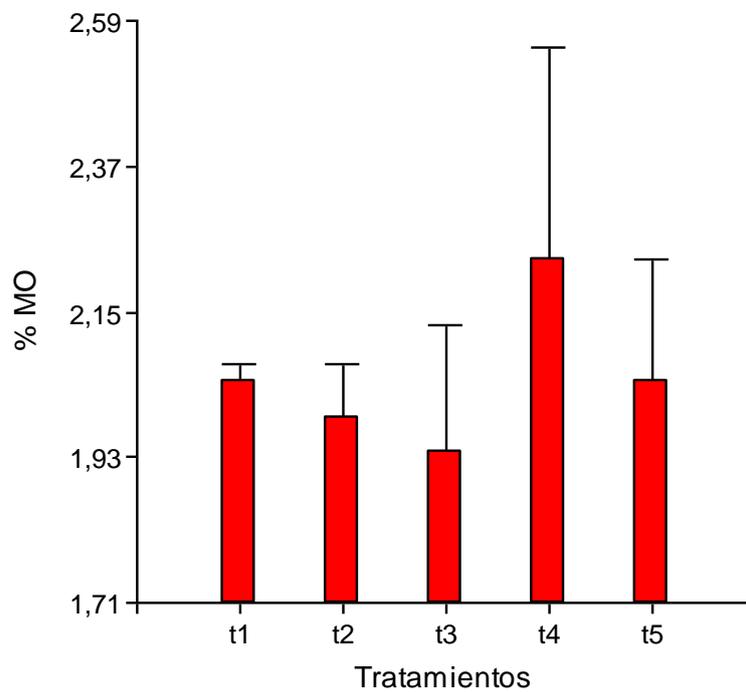


Figura 14: Contenidos de Materia Orgánica (%) en el suelo de 0 a 20 cm de profundidad para los distintos tratamientos (Con error estándar entre bloques de cada parcela)

Los niveles de materia orgánica del suelo no sufrieron cambios por efecto del agregado del biofertilizante. Las variaciones registradas son las normales de la variable de suelo estudiada, en el tiempo analizado. Sin embargo cabe mencionar que el digestato aporta gran cantidad de precursores húmicos (moléculas recalcitrantes), contribuyendo al aumento del Carbono Orgánico y la recuperación de los suelos (Adani, Fabrizio. 2009).

Además, el digestato promueve la actividad biológica del suelo, afectando los procesos de mineralización y humificación, contribuyendo al aumento de la retención de agua y la disminución de la lixiviación.

## Nitratos



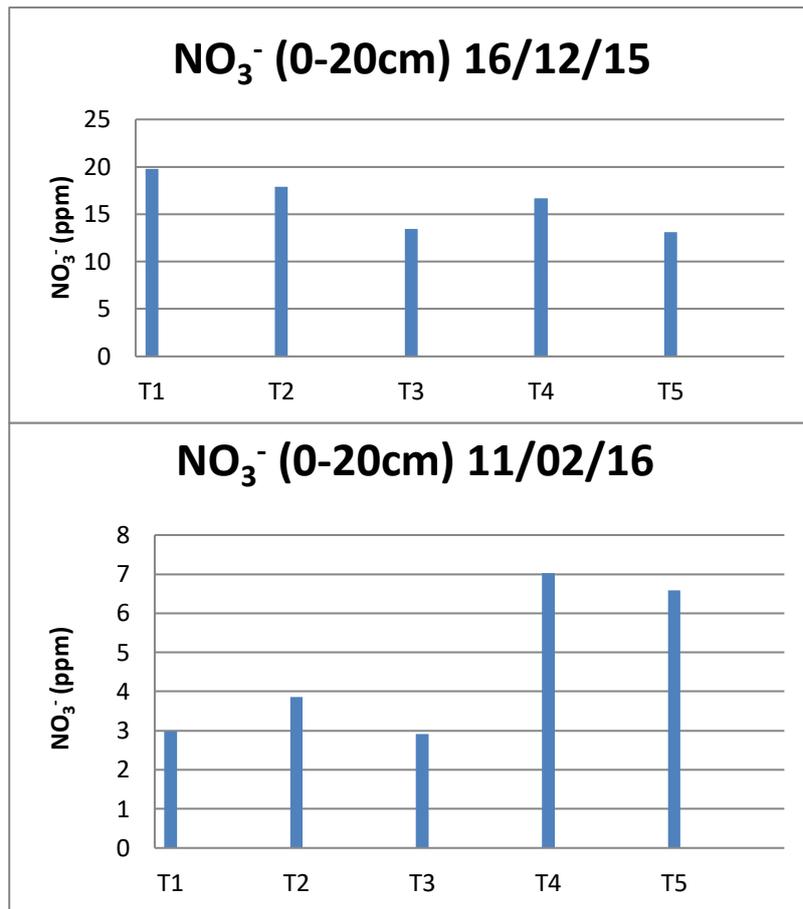
**Figura 15: Distintas muestras de suelo pertenecientes a las distintas parcelas del ensayo usadas para la determinación de nitratos.**

Se encontraron diferencias en los contenidos de nitratos en el suelo para las dos profundidades estudiadas (0-20 y 20-40 cm) y para los dos momentos del cultivo, semana de siembra diciembre y floración (Fig. 14 y 15).

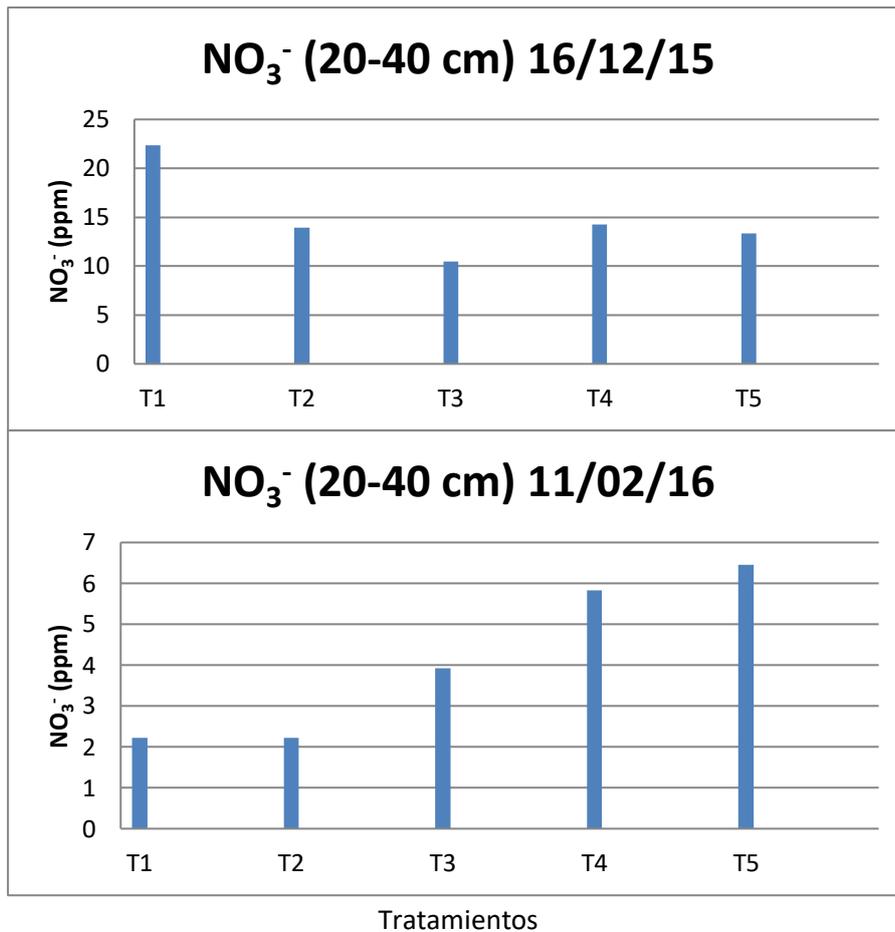
En la medición a floración las aplicaciones de biofertilizante en la semana anterior a la siembra, se encontraron los mayores niveles en el suelo en floración, hecho muy importante ya que es cuando se define el rendimiento del cultivo. Con la aplicación temprana (T1) las mayores disponibilidades de  $\text{NO}_3^-$  se encontraron más cercanas a la siembra del maíz.

Cabe aclarar que por las propiedades que posee el digestato, su aplicación determina una menor volatilización por su rápida incorporación al suelo.

La forma predominante disponible, en el digestato, para el vegetal es  $\text{NH}_4^+$ , debido a la mineralización del N org en la digestión anaeróbica, lo que mejora la eficiencia en el uso del N.



**Figura 16: Niveles de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 0 - 20 para dos etapas del cultivo de maíz para los distintos tratamientos con digestato como biofertilizante.**



**Figura 17: Niveles de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 20 - 40 para dos etapas del cultivo de maíz para los distintos tratamientos con digestato como biofertilizante.**

En el período posterior a la aplicación del digestato hubo una importante cantidad de precipitaciones que pueden haber provocado una lixiviación de nitratos a capas inferiores. El nivel de nitratos tiene alta variabilidad tanto temporal como espacial. Los niveles de nitratos en febrero son inferiores debido a la extracción del cultivo.



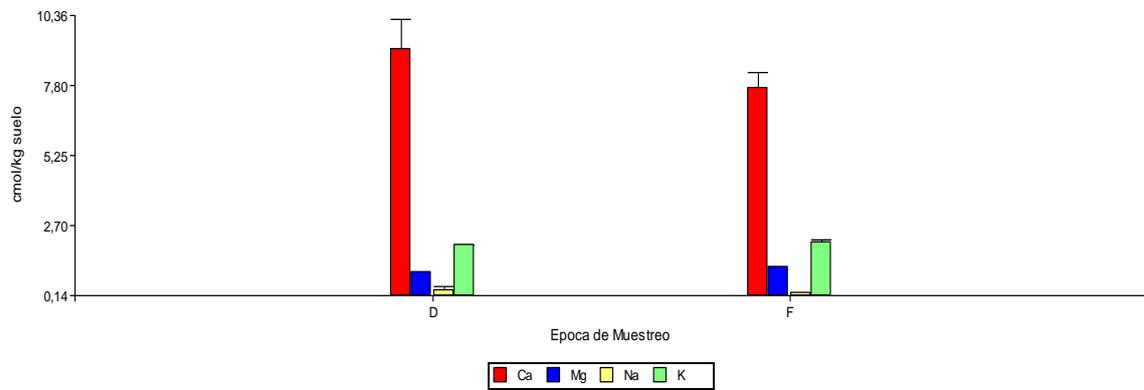
**Figura 18: Tratamiento Testigo, plantas de maíz marcando deficiencias de N por removilización.**



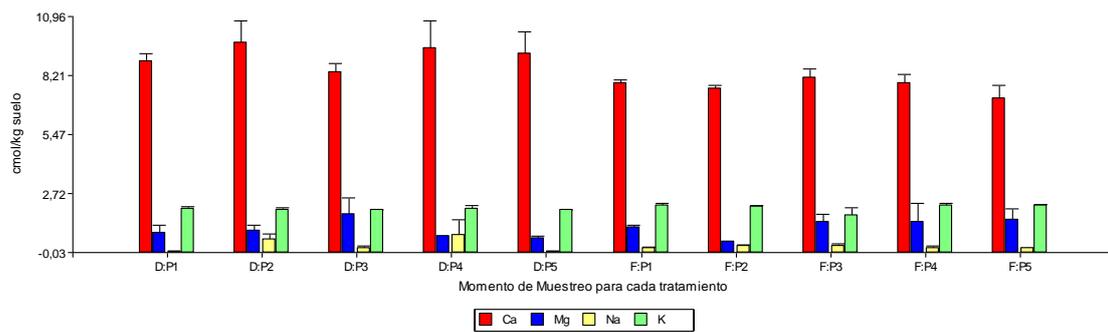
**Figura 19: Tratamiento 4: plantas de maíz con bajo nivel de removilización de N.**

## Bases intercambiables

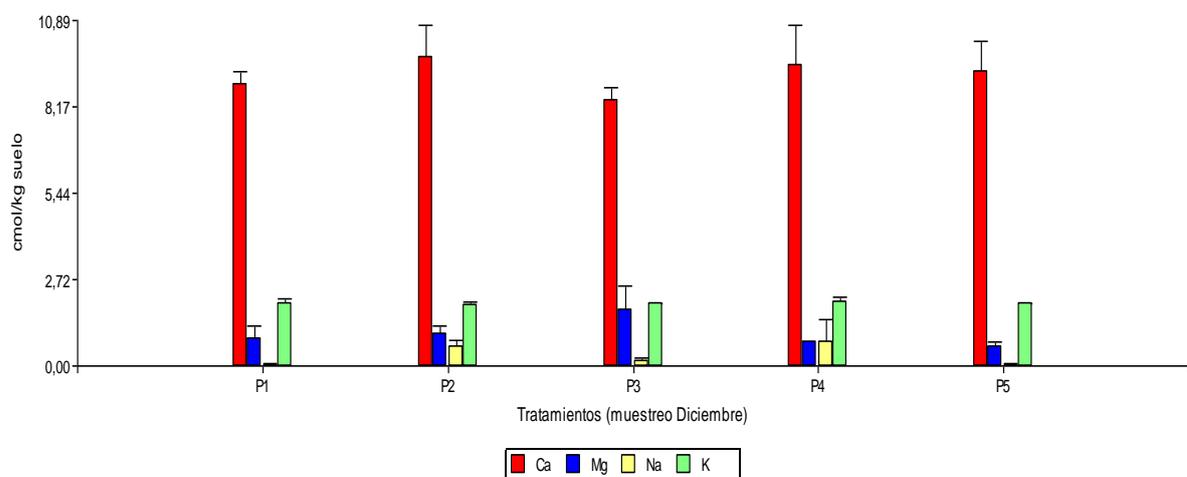
El digestato aporta de bases como Ca, K y Mg.



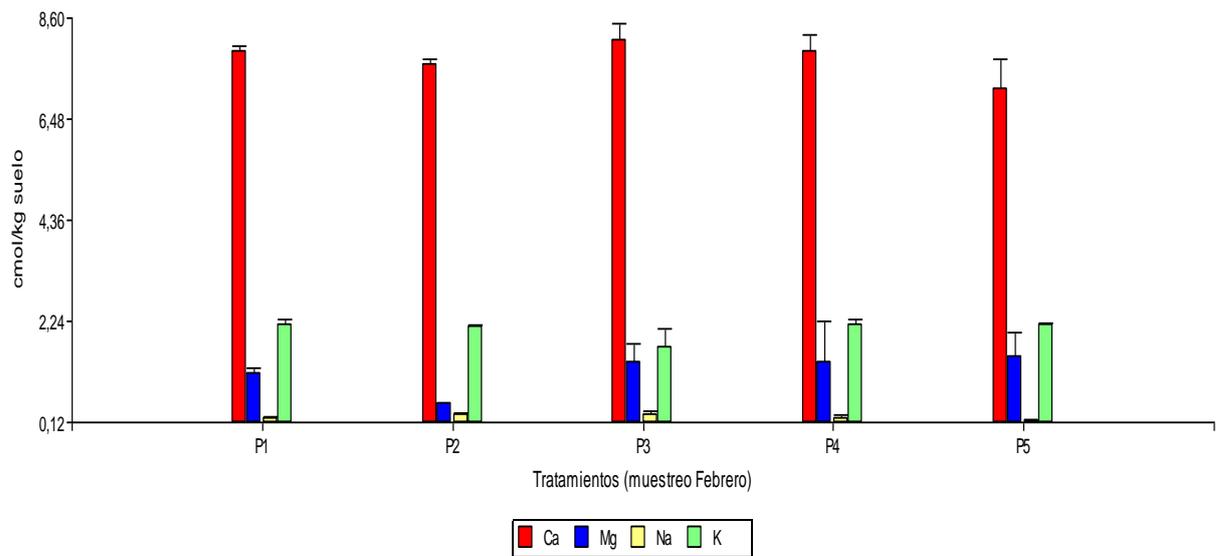
**Figura 20:** Promedio de bases de todas las parcelas en dos momentos de muestreo (Diciembre=D: inicio cultivo; y Febrero=F: Alrededor de floración).



**Figura 21:** Nivel de bases expresadas en cmol/kg de suelo de cada parcela en las dos épocas de muestreo mencionadas.



**Figura 22:** Contenido de bases intercambiables para los distintos tratamientos en las muestras tomadas el mes de Diciembre.



**Figura 23: Contenido de bases intercambiables para los distintos tratamientos en las muestras tomadas el mes de Febrero.**

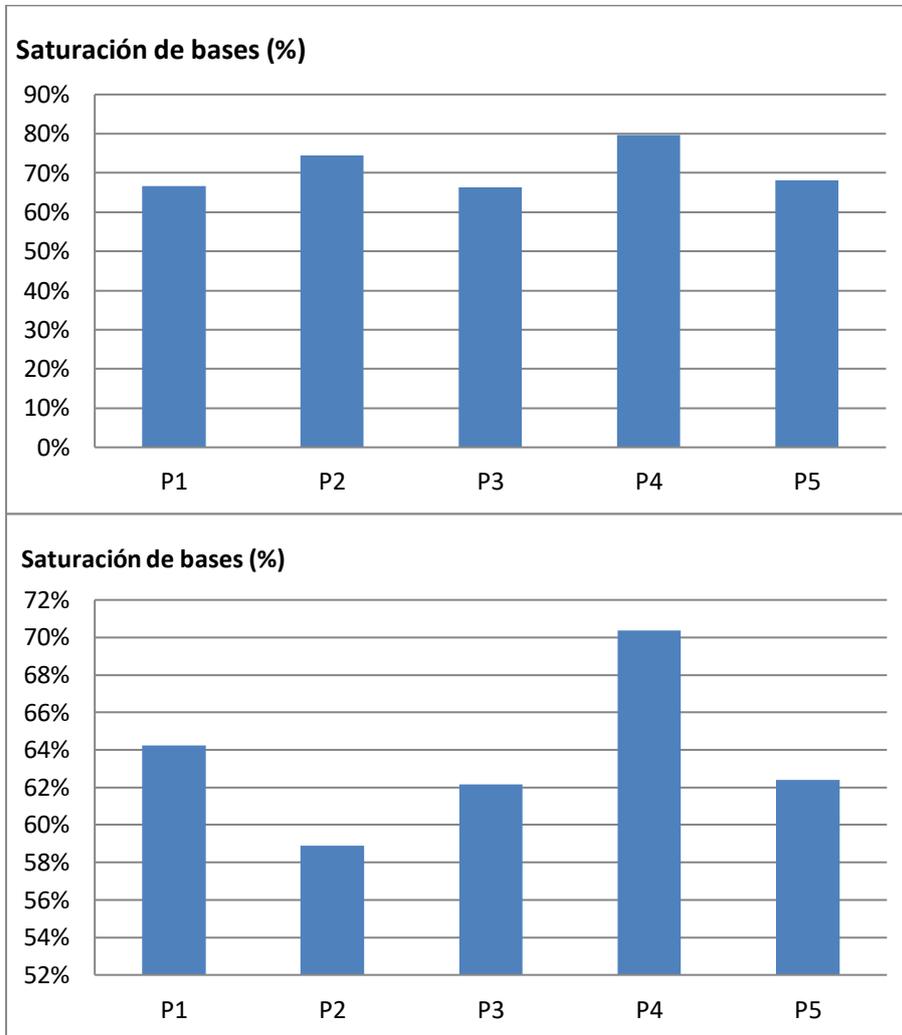
Se puede observar que hubo un leve aumento de bases intercambiables de diciembre a febrero de algunas parcelas con respecto a la testigo, de lo cual se deduce la liberación lenta de nutrientes como consecuencia de la estabilidad biológica del producto y la respuesta a la aplicación de dosis crecientes.

Esto es importante en suelos excesivamente drenados con problemas de lavado de bases, ya que además del aporte de bases por parte del digestato, este contribuye a elevar el pH y mejorar la retención de agua por su efecto sobre la estructura del suelo.

También se puede observar que en ninguno de los casos el digestato altero la relación de bases existente, ni origino desequilibrios.

## Saturación con bases

En este caso, se observa una respuesta tardía al efecto del digestato, notándose como la parcela testigo es la que menor valor presenta de saturación en el muestreo de Febrero, probablemente como consecuencia de la lixiviación de bases por la lluvia.



**Figura 24: Saturación de Bases en dos épocas de muestreo (Diciembre arriba y Febrero abajo) para las parcelas con aplicación de digestato (1, 3, 4 y 5) y la testigo (2).**

## Actividad biológica

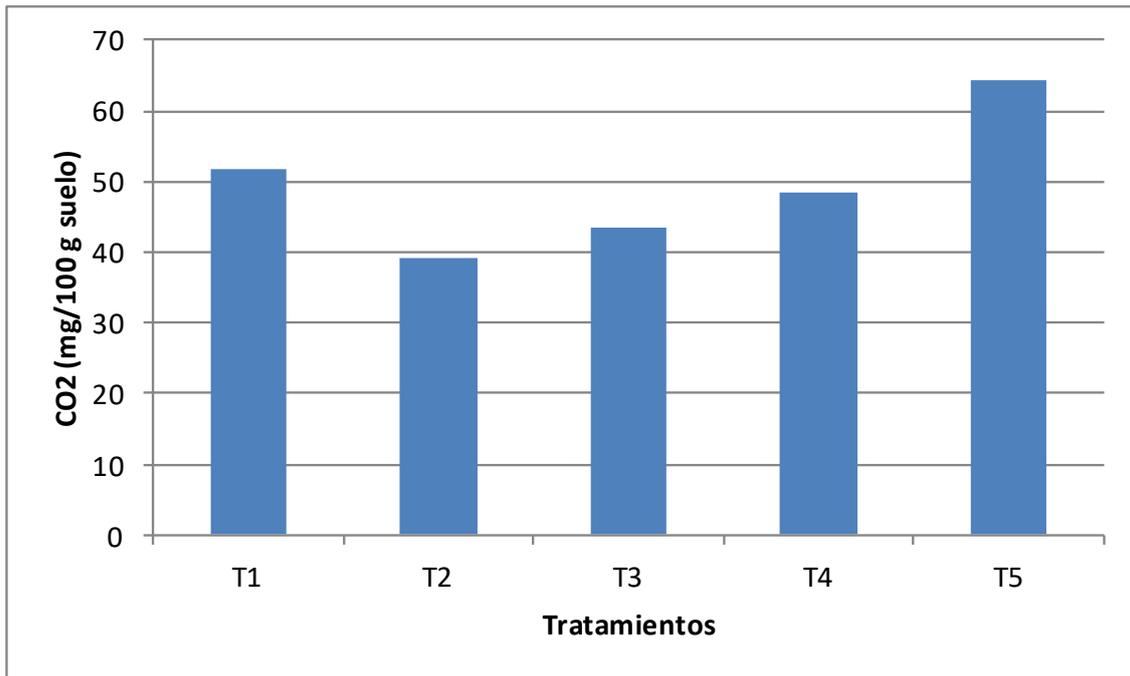


Figura 25: Actividad Biológica Global, CO<sub>2</sub> acumulado, liberado por efecto de la respiración en el suelo, al los catorce días de incubación para los diferentes tratamientos con biofertilizante.

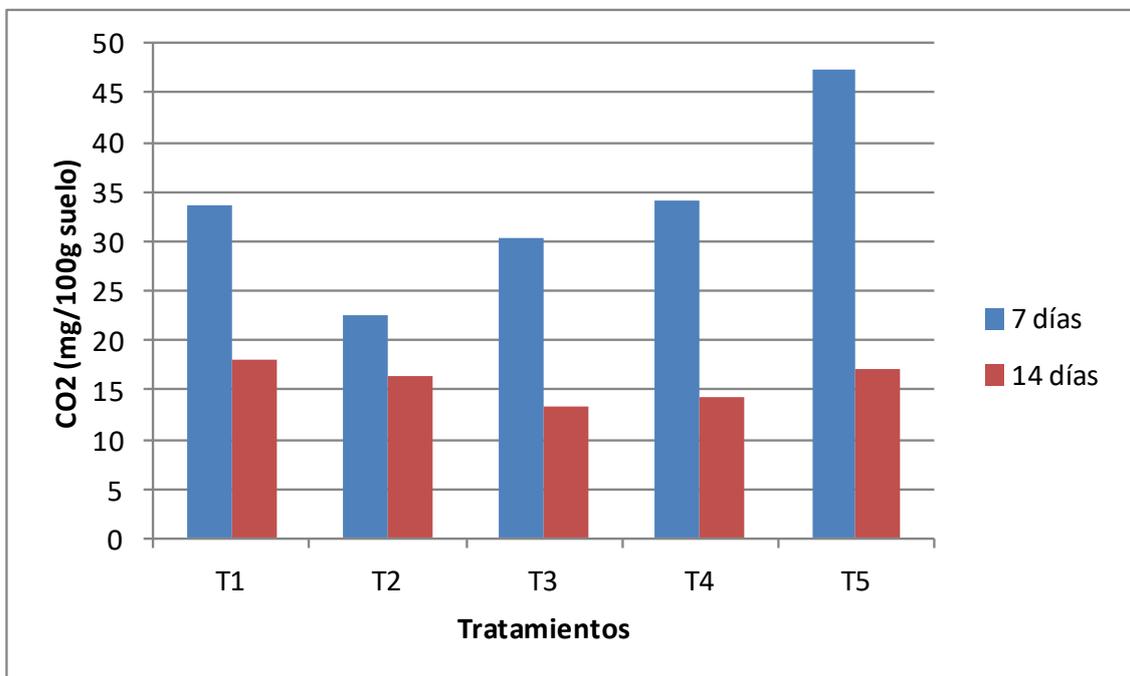
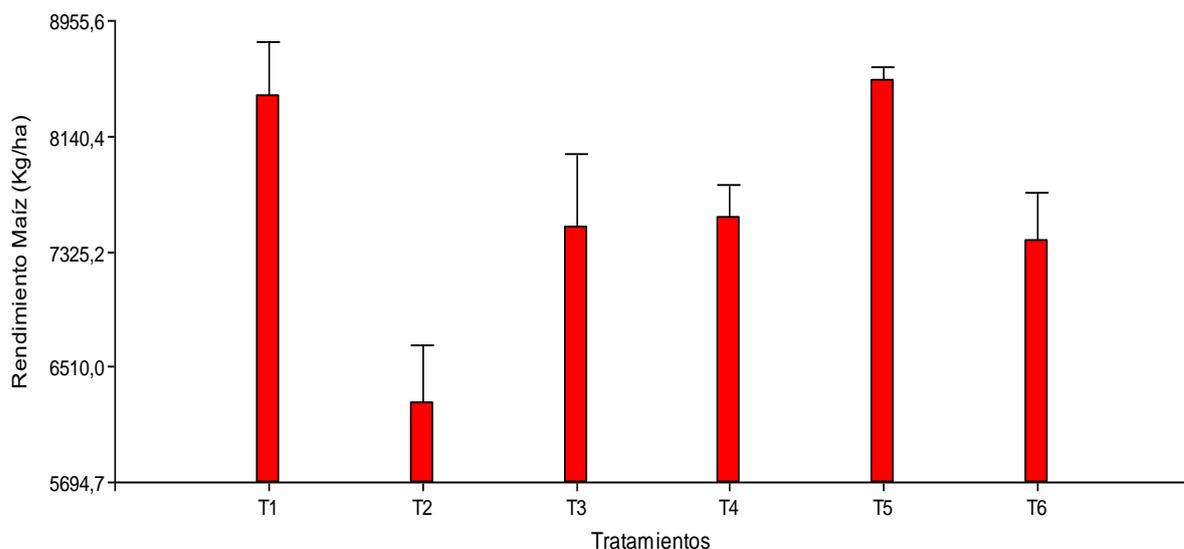


Figura 26: Actividad Biológica Global, CO<sub>2</sub> liberado por efecto de la respiración en el suelo a los 7 y 14 días de incubación para los diferentes tratamientos con biofertilizante.

La aplicación de digestato provocó un aumento en la actividad biológica del suelo, como consecuencia del aporte de un sustrato rico en precursores orgánicos. Esto pudo haber generado un incremento en la cantidad y variedad de la microflora del suelo y en la rizósfera, mejorando así la disponibilidad y solubilización de nutrientes, y por ende el vigor y crecimiento vegetal.

Esto es importante para favorecer la disminución de microorganismos benéficos de los suelos ayudando a aumentar controladores biológicos y otros microorganismos potencialmente benéficos.

## Rendimiento de maíz



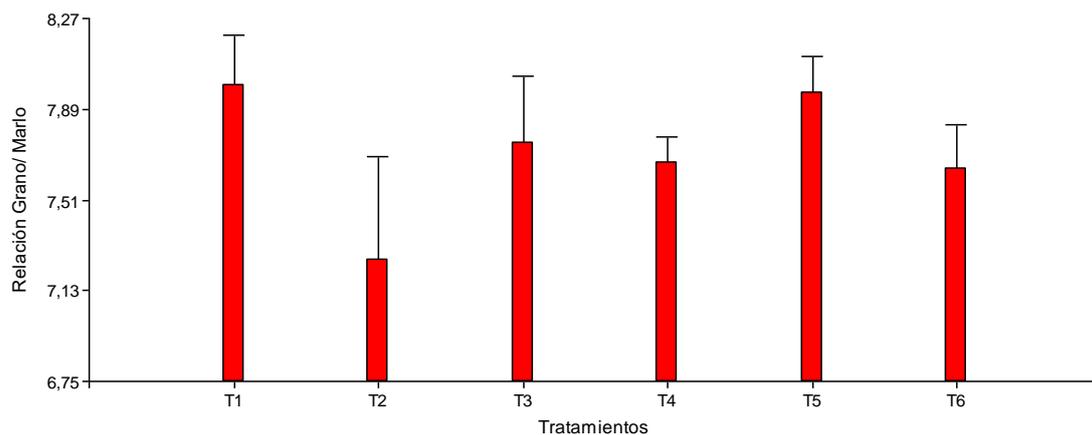
**Figura 27: Rendimiento de Maíz para los distintos tratamientos con digestato utilizado como biofertilizante (T1, T3, T4 y T5), testigo (T2) y fertilización con Urea y Fosfato diamónico (T6).**

La aplicación del biofertilizante (T1, T3, T4 y T5) tuvo efectos significativos sobre el rendimiento cuando se lo compara con el tratamiento testigo (T2). Con la aplicación del biofertilizante se obtuvieron rendimientos que superaron en 12 a 16 qq ha<sup>-1</sup> al testigo.

Lo destacable es que con la aplicación del biofertilizante en dosis bajas y medias (T3 y T4) se obtuvieron rendimientos similares a la fertilización con Urea y Fósforo (T6). Con la dosis máxima (T5) y media anticipada un mes antes de la siembra (T1), se lograron rendimientos superiores a la aplicación de fertilizantes comerciales.

También se notaron diferencias a nivel vegetativo, como por ejemplo mayor altura y área foliar en los tratamientos con mayor dosis, determinando esto mayores valores de biomasa total en floración. Esta respuesta se debe mayormente al aporte de macro (N, P, K, Ca, Mg) y micro nutrientes (Zn, Mo, B, etc.) por parte del digestato, y a otros factores como el aumento de la actividad biológica del suelo y mejoras en sus propiedades fisicoquímicas.

Otro efecto positivo sobre el rendimiento es a través del aporte de hormonas vegetales de crecimiento o fitoreguladores (producto del desecho metabólico), como las Adeninas, Purinas, Giberelinas, Auxinas y Citoquininas, las cuales promueven el crecimiento de la planta, raíces y frutos, mejorando la productividad y calidad del cultivo y responde a un planteo orgánico (Schievano, A. 2008).



**Figura 28: Efecto de los distintos tratamientos con digestato como biofertilizante en la relación Grano/ Marlo de maíz**

La aplicación de biofertilizante mejoró la relación grano/ marlo al brindar mejores condiciones fisiológicas en el momento crítico de definición del rendimiento. Este dato está relacionado con el número y peso de los granos, componentes principales del rendimiento de maíz.



**Figura 29: Plantas representativas de cada tratamiento (de arriba hacia abajo; Parcela 1, Parcela 2, Parcela 3, Parcela 4, Parcela 5 y Parcela con fertilizante sintético).**



**Figura 30: Efecto del digestato en cultivo de maíz prefloración**



**Figura 31: Comparación de las espigas de las parcelas 6 (fertilizante sintético), parcela 5 (3 dosis de digestato) y parcela 2 (parcela testigo), de arriba a abajo.**



**Figura 32: Comparación entre espigas de los tratamientos, de izquierda a derecha, parcela testigo, parcela con máxima dosis de digestato y parcela con fertilizante sintético.**



**Figura 33: Comparación entre las espigas de la parcela con fertilizante vs espigas de la parcela con máxima dosis de digestato ( $36 \text{ m}^3$ )**



**Figura 34: Comparación entre las espigas de la parcela con doble dosis de digestato ( $24 \text{ m}^3$ ) de aplicación temprana vs espigas de la parcela con máxima dosis de digestato ( $36 \text{ m}^3$ )**

## Cálculos de equivalencias nutricionales del digestato

### **RESULTADOS**

			Fecha de ejecución del ensayo
Nitrógeno total sin nitratos:	0,4	g/ 100 g	14/03/2016
Fósforo soluble en agua:	0,05	g/ 100 g	03/03/2016
Potasio soluble:	0,3	g/ 100 g	14/03/2016
Calcio:	0,05	g/ 100 g	11/04/2016
Magnesio :	0,02	g/ 100 g	18/03/2016
Manganeso menor a:	0,001	g/ 100 g	01/04/2016
Zinc :	0,001	g/ 100 g	01/04/2016
Molibdeno menor a:	0,001	g/ 100 g	05/04/2016
Sodio:	0,07	g/ 100 g	21/03/2016
Boro soluble en ácido:	0,003	g/ 100 g	29/02/2016
Cloruros:	0,06	g/ 100 g	16/03/2016
pH :	7,7		18/03/2016
Materia orgánica sobre producto húmedo:	4,1	g/ 100 g	30/03/2016
Cenizas sobre producto húmedo:	1,3	g/ 100 g	30/03/2016
Materia orgánica sobre producto seco:	76,2	g/ 100 g	30/03/2016
Cenizas sobre producto seco:	23,8	g/ 100 g	30/03/2016
Humedad:	94,6	g/ 100 g	15/03/2016
Relac C/N :	6		
Conductividad :	19,0	mS/cm	15/03/2016

Densidad = 1 gr / cm<sup>3</sup>

Cantidades de cada nutriente presente por litro de digestato

#### **Nitrógeno:**

0.4 gr / 100 gr o cm<sup>3</sup> = 4 gr L<sup>-1</sup>

#### **Fosforo:**

0,05 gr / 100 gr o cm<sup>3</sup> = 0.5 gr L<sup>-1</sup>

#### **Zinc:**

0.001 gr / 100 gr o cm<sup>3</sup> = 0.01 gr L<sup>-1</sup>

### **Aporte de nutrientes de acuerdo a dosis y explicación de rendimiento a partir de testigo**

Rendimiento parcela testigo = 6300 kg.

#### **Parcela 1**

Rendimiento= 8300 kg

Dosis aplicación = 24000 lts.

**Aporte N:** 96 kg / ha.

**Aporte P:** 12 kg / ha.

**Aporte Zn:** 240 gr / ha.

} Diferencia de rendimiento testigo = 2000 kg.

#### **Parcela 3**

Rendimiento= 7400 kg

Dosis aplicación = 12000 lts.

**Aporte N:** 48 kg / ha.

**Aporte P:** 6 kg / ha.

**Aporte Zn:** 120 gr / ha.

} Diferencia de rendimiento testigo = 1100 kg.

#### **Parcela 4**

Rendimiento= 7600 kg

Dosis aplicación = 24000 lts.

**Aporte N:** 96 kg / ha.

**Aporte P:** 12 kg / ha.

**Aporte Zn:** 240 gr / ha.

} Diferencia de rendimiento testigo = 1300 kg.

#### **Parcela 5**

Rendimiento= 8500 kg

Dosis aplicación = 36000 lts.

**Aporte N:** 144 kg / ha.

**Aporte P:** 18 kg / ha.

**Aporte Zn:** 360 gr / ha.

} Diferencia de rendimiento testigo = 2200 kg.

#### **Parcela 6 (Fertilizada)**

Rendimiento= 7400 kg

Dosis aplicación = 120 kg Urea + 80 kg FDA

**Aporte N:** 71.2 kg / ha.

**Aporte P:** 36 kg / ha.

**Aporte Zn:** -

} Diferencia de rendimiento testigo = 1100 kg.

#### **Observaciones**

Los tratamientos 1 y 4 tuvieron la misma dosis de aplicación, sin embargo la 1 rindió 700 kg. mas. Esto puede explicarse por el mayor tiempo que tuvo la parcela 1 para que se liberen nutrientes del digestato.

El tratamiento 5, que tuvo la mayor dosis de digestato, fue la que mayor rindió, aunque no tuvo mucha diferencia con la parcela 1, pudiendo deberse esto al tiempo de permanencia del digestato en el suelo o a una saturación o máxima respuesta del cultivo.

En el tratamiento 3 (mínima dosis de digestato) presenta un rendimiento similar al tratamiento fertilizado, a pesar de contar con aportes menores de nutrientes, especialmente P. Esto podría deberse a los efectos adicionales del digestato sobre el cultivo y el suelo, como el aporte de hormonas vegetales y PGPRs, aumento del vigor, mejora en la estructura y solubilización de nutrientes no disponibles.



**Figura 34:** Comparación entre espigas cosechadas de la parcela con máxima dosis (arriba) y la parcela testigo (abajo)

## Resultados Ensayo de Soja

### Fósforo (P)

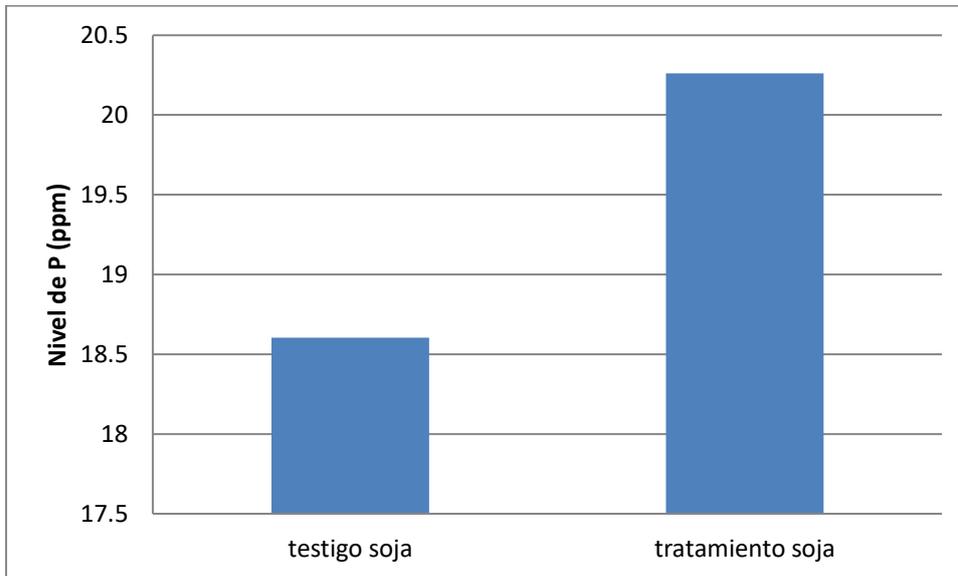


Figura 35: Niveles de P ext. entre la parcela testigo y la tratada con digestato en el cultivo de soja, durante el mes de diciembre.

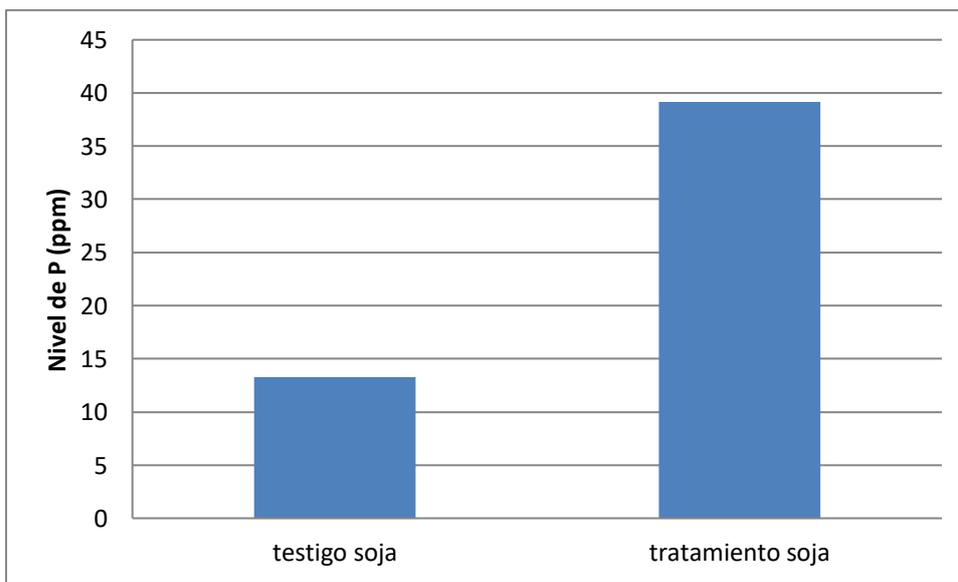


Figura 36: Niveles de P ext. entre la parcela testigo y la tratada con digestato en el cultivo de soja, durante el mes de febrero.

## Capacidad de intercambio catiónica

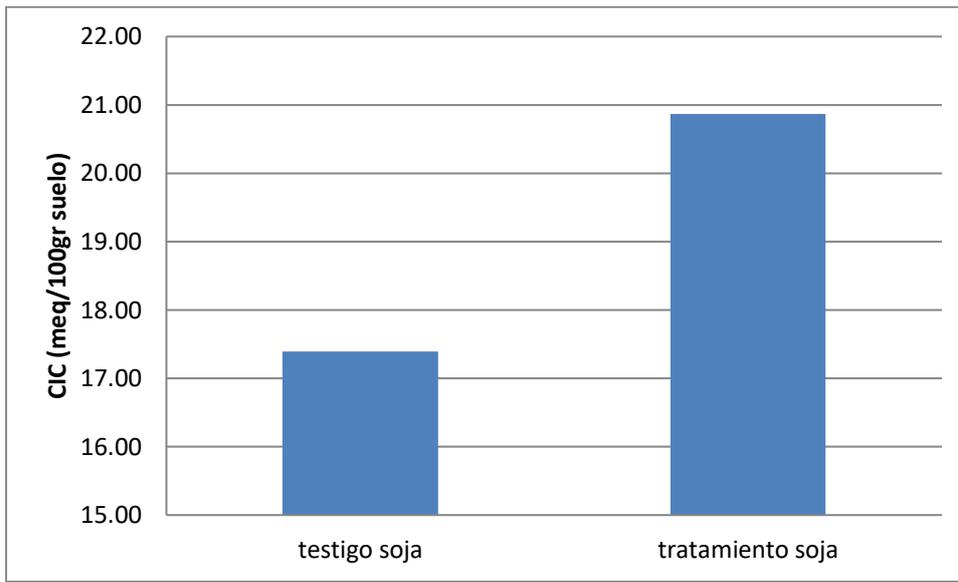


Figura 37: Valores de CIC de la parcela testigo y la tratada previo a la siembra.

## Conductividad eléctrica

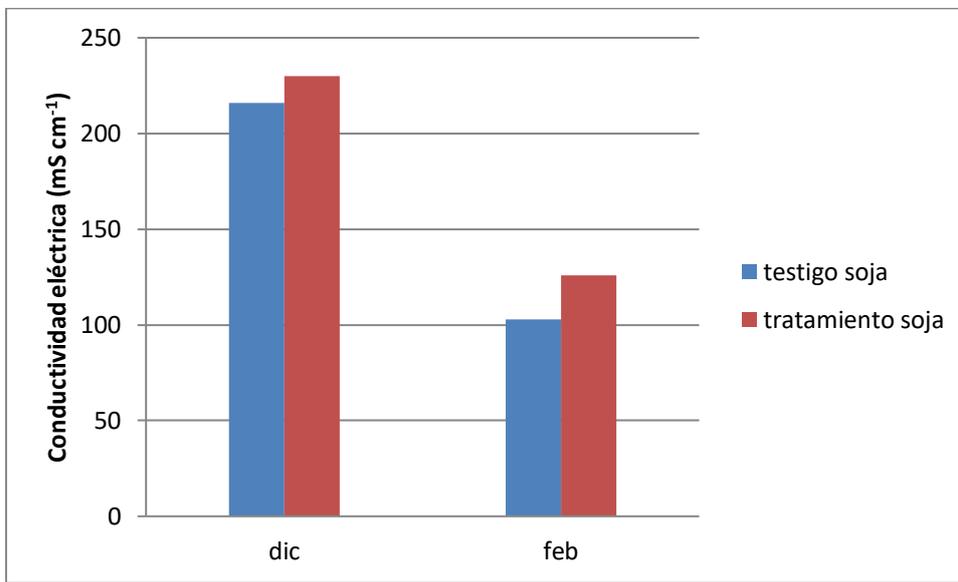
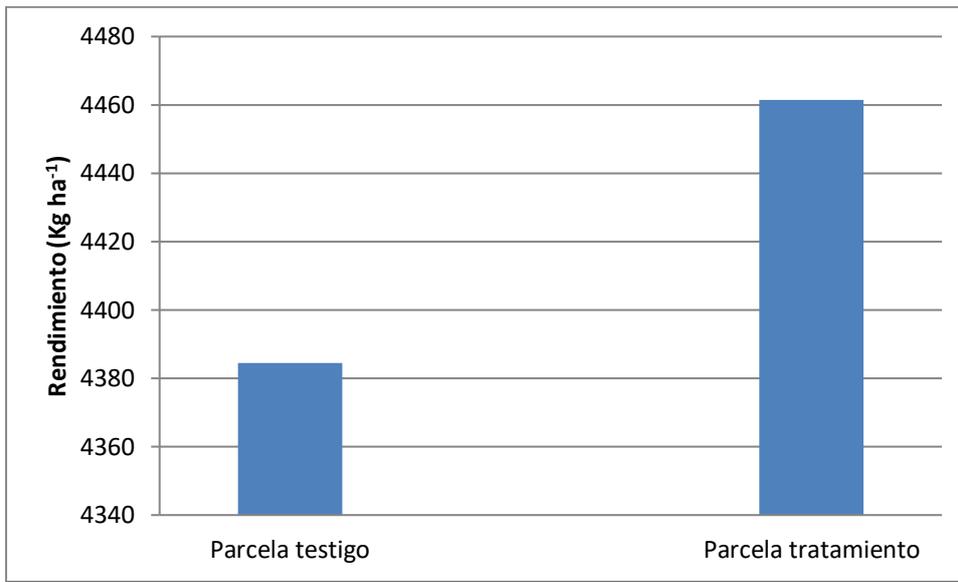


Figura 38: Valores de CE de parcela testigo vs parcela aplicada, en dos momentos de muestreo a 20 cm.

## Rendimiento



**Figura 39: Rendimiento en grano del cultivo de soja en la parcela testigo y la aplicada con digestato.**

Los efectos más destacados en el cultivo de soja por la aplicación del digestato fueron su mayor crecimiento vegetativo, en altura y ramificación, al igual que un mayor número de vainas por nudo y granos por vaina.

No se registraron diferencias en la nodulación entre la soja con la aplicación del digestato y la testigo.



**Figura 40: Comparación a nivel vegetativo entre plantas de la parcela tratada (izquierda) vs plantas de la parcela testigo (derecha).**



**Figura 41: Cultivo de soja donde se realizaron los tratamientos.**



**Figura 42: Comparación entre las dos parcelas de soja. A la izquierda planta que corresponde a la parcela testigo (sin aplicación de digestato) y a la derecha planta que corresponde a la parcela aplicada con 2 dosis de digestato.**

La planta de la parcela tratada tenía aproximadamente unos 20 cm más de altura y contaba con mayor cantidad de vainas totales.

## Conclusiones

El uso de digestato como biofertilizante de base orgánica mineral al final de la experiencia no modificó propiedades físico-químicas del suelo como son pH y CE, manteniendo los niveles dentro de los parámetros óptimos para el crecimiento de maíz.

La aplicación del biofertilizante tuvo efectos positivos en los niveles de P, dejando un remanente en el suelo en las dosis mayores aplicadas, cumpliendo con un criterio de restitución.

El rendimiento de maíz con aplicación de biofertilizante respondió en forma positiva y en forma comparable a la aplicación de fertilizantes sintéticos.

Se comprobó el valor del digestato como biofertilizante mediante el aumento en el rendimiento del cultivo, entre otros. Además, aunque no se comprobó en esta práctica empíricamente, ya hay registros de sus propiedades como mejorador de la estructura física del suelo (lucha contra la desertificación y retención de humedad), sanidad de los cultivos (nutrición balanceada y trofobiosis) y promotor de la actividad biológica de los suelos.

Su aplicación permite desarrollar lo que es un planteo de agricultura circular donde se pueden volver a reutilizar los minerales tomados por los cultivos y evitar las practicas extractivas, logrando una complementación que disminuye los desperdicios y excesos y promueve la eficiencia y bienestar ambiental. También permite generar al mismo tiempo energía eléctrica y térmica, aumentando de gran manera la eficiencia energética del sistema agro ganadero.

La relación C/N del digestato no produjo efectos de inmovilización en el suelo que puedan haber afectado la disponibilidad de N para el cultivo.

La gran estabilidad biológica del digestato permite que los valores de demanda biológica y química se mantengan bajos, evitando así procesos de inmovilización de nutrientes u otros efectos negativos, importante diferencia con la aplicación sin tratar de estiércoles ganaderos.

A pesar de no haberse comprobado, se notan a simple vista posibles efectos PGPR (fitorreguladores) sobre el cultivo, como producto de la acción de grupos de hormonas vegetales aportadas por el digestato, que promueven el enraizamiento y la expansión foliar, y mejoran la floración y el vigor reproductivo del cultivo.

La mayoría de los nutrientes en el ingestato mantienen sus niveles luego del procesamiento y elaboración del digestato, significando esto que no se pierden en la formación del biogás.

Hasta ahora, el mayor inconveniente que presenta esta tecnología es la logística de aplicación del producto, ya que al no realizarse una separación o tratamiento este queda en estado liquido y diluido, requiriendo muchos movimientos y consumo de combustible para su aplicación.

## **PRESUPUESTO Y FUENTE DE FINANCIAMIENTO**

Los análisis y técnicas que se utilizaran se realizarán en la UNRC. Aquellos que no puedan realizarse en dicho lugar, serán realizados en instituciones privadas y sus costos serán cubiertos por los autores de este trabajo.

El material a utilizar, tanto el digestato, la maquinaria y la semilla para el cultivo y los fertilizantes sintéticos son aportados por la empresa Bio Eléctrica, la cual es la involucrada en esta práctica.

Los costos de transporte y viáticos son cubiertos por los alumnos responsables de dicha práctica.

## BIBLIOGRAFIA CITADA

- Adani, Fabrizio. 2009. Anaerobic digestion: Opportunities for Agriculture and Environment. 1 era ed. Editorial Tipograf, Crema.
- Bernal, M.P., Albuquerque, J.A., Bustamante, M.A. and Clemente, R., 2011. Guía de Utilización Agrícola de Materiales Digeridos por Biometanización. Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura, Consejo superior de Investigaciones Científicas. 1-103.
- Bioeléctrica 2016. Río Cuarto. En: <http://www.bioelectrica.com/>
- Cecchi, F. 2008. State-of-the-art of R&D in the anaerobic digestion process of municipal soil waste in Europe. Biomass. 16: 257-284.
- CLIMATE-DATA ORG. 2017. Clima Río Cuarto. En: <https://es.climate-data.org/location/1905/>. Consultado: 22/03/2017
- D'Imporzano and Adani, G. 2007. The contribution of water soluble and water insoluble organic fraction to oxygen uptake rate during high composting. Biodegradation. 18: 103-113.
- Guía IDEA, 2007. Biomasa y digestión anaerobia.
- INTA. 1994. Carta de suelos de la república Argentina. Manfredi, Córdoba, Argentina.
- Masse, D. I. 2007. The fate of crop nutrient during digestion swine manure in psychrophilic anaerobic sequencing batch reactor. Bioresource technology. 98: 2819-2823.
- Nelson and Sommer 1982. Total carbon, and organic matter. Pp 539-537. Page A., Miller R. and D. Keeney (ed.) Methods of soils analisis. Part. 2 Chemical and Microbiological properties. Agronomy monograph N°9 ASA, SSSA. Wisconsin, USA.
- OLSEN, S. R. and L. E. SOMMERS 1982. Phosphorus, en methods of soil analysis, , part 2, Chemical and Microbiological properties, Agronomy monographs, no. 9 Second edition, ASA.SSSA., pp 403-446.
- Schievano, A. 2008. Predicting anaerobic biogasification potential of ingestate and digestate of a full-scale biogas plant using chemical and biological parameters. Bioresource technology. 99: 8112-8117.
- Seiler et al., 2010. Descripción climática del sur de Córdoba. Publicación.
- Sorensen, P. Moller, H. B. 2008. The faith of nitrogen in pig and cattle slurries applied to the soil-crop system. Publicación.
- Zapata F. Recuperación y Aprovechamiento Energético de Metano en un Sistema de Codigestión para la Reducción de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero. Máster de Ingeniería Ambiental y de Procesos Químicos y Biotecnológicos. Cartagena, 16 de Abril de 2012.