

Universidad Pública de Navarra

Nafarroako Unibertsitat Publikoa

**ESCUELA TECNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS AGRONOMOS**

*NEKAZARITZAKO INGENIARIEN
GOI MAILAKO ESKOL TEKNIKOA*

**RESPUESTA PRODUCTIVA DE UN CULTIVO DE MAÍZ
("ZEA MAYS" L. VAR. DRACMA) A DISTINTAS DOSIS DE
NITROGENO CON DOS TIPOS DE RIEGO (ASPERSIÓN E
INUNDACIÓN) Y EFECTO SOBRE LA LIXIVIACIÓN DE
NITRATOS**

presentado por

Montserrat Oyarzun Arrechea

**INGENIERO AGRONOMO
NEKAZARITZA INGENIARITZA**

Septiembre, 2010

RESPUESTA PRODUCTIVA DE UN CULTIVO DE MAÍZ (“*ZEA MAYS*” *L. VAR. DRACMA*) A DISTINTAS DOSIS DE NITROGENO CON DOS TIPOS DE RIEGO (ASPERSIÓN E INUNDACIÓN) Y EFECTO SOBRE LA LIXIVIACIÓN DE NITRATOS.

El maíz, es uno de los cultivos extensivos con extracciones más elevadas de nitrógeno. Las producciones de este cereal son cada vez más altas y consecuentemente las extracciones de N. Una fertilización nitrogenada adecuada, permite obtener un elevado retorno económico de la inversión a través de la calidad y de la producción óptima del cultivo. Sin embargo, una mala gestión del nitrógeno (N), puede ocasionar múltiples problemas medioambientales (lixiviación de nitrógeno residual del suelo hacia aguas subterráneas, pérdidas por desnitrificación, volatilización, y eutrofización), junto a descensos de la rentabilidad de la explotación por un uso innecesario de insumos y unas pérdidas de rendimiento.

Por tanto, la agricultura se sitúa hoy en la necesidad de ajustar las dosis y forma de aplicación de fertilizantes nitrogenados. De esta manera serán aprovechados de manera óptima y generarán la menor cantidad de efectos indeseables. Conseguirlo reportará beneficios económicos así como ambientales; a su vez se mantendrá e incluso aumentará la producción del cultivo del maíz.

Los objetivos de este trabajo fin de carrera son los siguientes:

- Determinación de la dosis óptima de fertilizante nitrogenado en maíz (“*Zea Mays*” *L. var. Dracma*).
- Determinación de la influencia del tipo de riego (aspersión e inundación) en la lixiviación de nitratos.
- Establecer un balance de N en el sistema suelo-planta.

Para el estudio de lixiviación de nitratos y balance de nitrógeno se empleó un diseño experimental en split-plot o parcela dividida. El factor principal o parcela principal fue el riego (inundación y aspersión) y la subparcela fue el nitrógeno (0, 240 y 320 kgN.ha⁻¹).

Para el estudio del rendimiento del cultivo en riego por aspersión se empleó un diseño de bloques completos al azar. La parcela principal se dividió en cuatro bloques. En cada bloque se asignaron de manera aleatoria los diferentes tratamientos (0,80, 160, 240 y 320 kg N ha⁻¹).

Se observaron diferencias significativas en el rendimiento para el factor fertilización y para el factor riego; no existió interacción fertilización –tipo de riego. Los rendimientos fueron superiores en riego por aspersión 11.395 kg ha⁻¹ frente al riego por inundación 7.926 kg ha⁻¹. La aplicación de nitrógeno sobre el cultivo de maíz provocó un aumento de biomasa y un mayor rendimiento; la dosis óptima se situó entre 240 y 320 kg N ha⁻¹

La cantidad de nitratos lixiviada se vio afectada tanto por la dosis fertilización como por el tipo de riego utilizado. El sistema de riego por inundación generó una pérdida de nitratos superior al sistema de riego por aspersión. Dentro del factor fertilización encontramos diferencias significativas, las cuales se producen entre los tratamientos con dosis de 240 kg N ha^{-1} y dosis de 320 kg N ha^{-1} .

El balance general de entradas y salidas del nitrógeno en el sistema suelo-planta para las variables estudiadas fue positivo tanto en aspersión como en inundación, así como para los tratamientos de 240 y 320 Kg N.ha^{-1} , lo cual supone que las entradas al sistema fueron superiores a las salidas del mismo. El nitrógeno absorbido por el cultivo para producir una tonelada de grano fue de $19\text{-}25 \text{ Kg N/T grano}$, en parcelas regadas por aspersión y la cantidad de nitrógeno absorbido en parcelas regadas mediante inundación, se situó entre $18\text{-}24 \text{ Kg N/ T grano}$. El mejor aprovechamiento del nitrógeno aplicado se detectó para aportaciones de 240 kg N ha^{-1} en aspersión, que correspondió a la dosis recomendada.

INDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN.....	10
2. ANTECEDENTES.....	13
2.1. Situación actual del maíz grano.....	14
2.1.1. A nivel mundial.....	14
2.1.2. En España.....	16
2.1.3. En Navarra.....	17
2.2. Ciclo vegetativo del maíz.....	18
2.2.1 Nascencia.....	19
2.2.2 Crecimiento.....	19
2.2.3 Floración.....	20
2.2.4 Fructificación.....	21
2.2.5 Maduración y secado.....	22
2.3. Ciclo del nitrógeno.....	22
2.3.1 Absorción de nitrógeno por la planta.....	24
2.3.2 Extracción por la cosecha.....	25
2.3.3 Mineralización e inmovilización.....	25
2.3.3.1 Aminización.....	25
2.3.3.2 Amonificación.....	26
2.3.3.3 Nitrificación.....	26
2.3.4 Desnitrificación.....	27
2.3.5 Volatilización.....	28
2.3.6 Fijación biológica.....	28
2.3.7 Aportaciones por lluvia.....	29
2.3.8 Lixiviación.....	29
2.3.9 Escorrentía.....	29
2.4 Lixiviación de nitratos.....	30
2.4.1 Fertilización nitrogenada y lixiviación de nitratos.....	31
2.4.2 Riego y lixiviación de nitratos.....	33
2.4.3 Medida de la lixiviación de nitratos.....	34
2.4.3.1 Métodos basados en medidas de gradiente hidráulico.....	34
2.4.3.2 Métodos basados en el balance de agua.....	34
2.4.3.3 Balance de cloruro.....	35
2.4.3.4 Métodos de muestreo de la solución drenante..	35
2.5 Fertilización nitrogenada.....	37
2.5.1 Fertilización nitrogenada en maíz.....	40
2.5.2 Fertilización nitrogenada del maíz en Navarra.....	43

3. OBJETIVOS.....	45
4. MATERIALES Y METODOS.....	47
4.1 Localización del ensayo.....	48
4.2 Diseño experimental.....	48
4.3 Material vegetal.....	51
4.4 Climatología de la campaña.....	51
4.5 Suelo.....	53
4.6 Labores de cultivo.....	54
4.6.1 Abonado de fondo.....	54
4.6.2 Siembra.....	54
4.6.3 Abonado de cobertera.....	55
4.6.4 Tratamientos fitosanitarios.....	55
4.6.5 Recolección.....	56
4.6.6 Riegos	57
4.7 Plan de muestreo.....	57
4.7.1 Seguimiento fenológico.....	57
4.7.2 Nitrógeno mineral del suelo.....	58
4.7.3 Muestreo de solución del suelo.....	59
4.7.4 Medición de humedad del suelo.....	59
4.7.5 Toma de muestras de biomasa aérea.....	60
4.7.6 Toma de muestras en cosecha.....	60
4.7.7 Balance hídrico.....	61
4.8 Balance de nitrógeno.....	62
4.9 Análisis estadístico.....	61
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	64
5.1 Respuesta del maíz a la fertilización nitrogenada.....	65
5.1.1. Respuesta del rendimiento del cultivo del maíz a la fertilización nitrogenada en riego por aspersión.....	68
5.2. Lixiviación de nitratos.....	71
5.2.1 Balance hídrico.....	71
5.2.2 Concentración de NO ⁻³ en cañas de vacío.....	73
5.2.3 Lavado de nitratos.....	74
5.3. Balance de nitrógeno.....	77
6. CONCLUSIONES.....	81
7. ANEJOS.....	84
8. BIBLIOGRAFÍA.....	90

INDICE DE FIGURAS

Nº	Título de la Figura	Pág.
1	Componentes y procesos del ciclo del nitrógeno.....	24
2	Localización del ensayo	48
3	Croquis del ensayo	49
4	Distribución de las cápsulas cerámicas y tubos de acceso FDR	50
5	Precipitación media diaria. Campaña 2004-2005	51
6	Evolución de temperaturas. Campaña 2004-2005	52
7	Sembradora de cereales de precisión	54
8	Barrena para muestreo del suelo.....	58
9	Diviner 2000. Equipo portátil para monitoreo de humedad del suelo	59

INDICE DE GRÁFICOS

Nº	Título del Gráfico	Pág.
1	Evolución de la producción de maíz a nivel mundial	15
2	Rendimiento de maíz (kg ha ⁻¹) para los dos tipos de riego y dosis de fertilización	67
3	Rendimiento de maíz para diferentes dosis de nitrógeno y riego por aspersión	69
4	Evolución de los componentes del balance hídrico	72
5	Variación de concentración de nitratos (mg l ⁻¹) en la solución del suelo en riego por aspersión	73
6	Variación de concentración de nitratos (mg l ⁻¹) en la solución del suelo en riego por inundación	73
7	Lixiviación de nitrógeno nítrico acumulado para aspersión e inundación y diferentes dosis de fertilizante nitrogenado.....	75

INDICE DE TABLAS

~ 8 ~

Nº	Título de la Tabla	Pág.
1	Balance de producción de maíz a nivel mundial	14
2	MAIZ: Serie histórica de superficie, rendimiento producción, valor y comercio exterior	17
3	Producción de maíz en Navarra	18
4	Tratamientos, dosis de nitrógeno y tipo de riego	50
5	Características del suelo. Campaña 2004-2005	53
6	Dosis de nitrógeno del ensayo	55
7	Producciones medias del cultivo de maíz (kg ha ⁻¹) para los dos tipos de riego y dosis de fertilización	65
8	Análisis de varianza para el rendimiento del cultivo de maíz (kg.ha ⁻¹)	65
9	Rendimiento del maíz (kg.ha ⁻¹) para los diferentes factores ensayados	66
10	Rendimiento del maíz (kg.ha ⁻¹) para los diferentes tratamientos ensayados	67
11	Rendimiento del maíz para los diferentes tratamientos ensayados en aspersión.....	68
12	Balance hídrico durante el periodo de cultivo de maíz en riego por aspersión	71
13	Balance hídrico durante el periodo de cultivo de maíz en riego por inundación	71
14	Análisis de varianza para nitratos lixiviados (kg NNO ³⁻ ha ⁻¹)	74
15	Lixiviación de nitrógeno nítrico acumulado (kg NNO ³⁻ ha ⁻¹) para diferentes dosis de nitrógeno y sistemas de riego.....	75
16	Componentes del balance de nitrógeno para riego por aspersión y dosis de 0, 240 y 320 kgN. ha ⁻¹	77
17	Componentes del balance de nitrógeno para riego por inundación y dosis de 0, 240 y 320 kgN. ha ⁻¹	77
18	Coefficientes aparentes de utilización del nitrógeno (CAU) y extracción de nitrógeno por kg de grano	79

1. INTRODUCCION

~ 10 ~

INTRODUCCIÓN

En el caso de la fertilización nitrogenada, el objetivo es obtener el máximo rendimiento con la aplicación de fertilizantes nitrogenados. El nitrógeno (N) es considerado el nutriente más importante para la producción vegetal debido a las cantidades requeridas por los cultivos y a la frecuencia con que se observan deficiencias en los suelos agrícolas.

El maíz es uno de los cultivos extensivos con extracciones más elevadas de nitrógeno. A menudo el abonado nitrogenado que se aporta al cultivo no se ajusta con las necesidades reales del cultivo, sino que por parte de técnicos y agricultores se aplican dosis excesivas para de ese modo asegurar la cosecha. Sin embargo esto puede llevar a un aumento del riesgo de contaminación de aguas freáticas y superficiales, costes innecesarios, pérdidas de nitratos por lixiviación, efectos tóxicos y desequilibrios nutricionales.

Las aplicaciones excesivas de nitrógeno no son deseables desde el punto de vista económico y ambiental, por lo tanto las mismas deben adecuarse a las necesidades del cultivo. Se han desarrollado métodos que permiten determinar las dosis y momentos óptimos de utilización del nitrógeno, para de este modo optimizar tanto producción, calidad y protección medioambiental.

Existen métodos de suelo (análisis de nitratos en pre-cobertera (PSNT), análisis de nitrógeno mineral en suelo (Nmin), electro-ultrafiltración (EUF), extracción con solución de CaCl_2 ,...), métodos de planta (contenidos de nitratos en la base del tallo, medidores de clorofila (N-Tester), SPAD,...) que ayudan a determinar la dosis óptima a aportar.

Se ha registrado relación directa entre el exceso de fertilizantes nitrogenados y el riesgo de lixiviación. Cuando se efectúan sobrefertilizaciones nitrogenadas, el Nitrógeno no aprovechado por el cultivo se acumula en el perfil y queda disponible para ser transportado por el agua percolante. Una vía importante de pérdida es la lixiviación, proceso importante en suelos bien drenados y de textura franca a francoarenosa. Para una misma dosis de fertilizante nitrogenado, por ejemplo 200 kg ha^{-1} , la lixiviación es mayor cuando el suelo presenta un drenaje más alto. Es un proceso muy importante sobre todo cuando se realizan aplicaciones tempranas, antes que los cultivos lleguen a la etapa de máxima demanda.

Así mismo, el riego incrementa el riesgo potencial de contaminación por nitratos, ya que los excesos de agua, bien por riego, bien por elevadas precipitaciones favorecen el movimiento de los nitratos hacia la profundidad. Una dosis ajustada de riego, que solo sature la capa que es explorada por las raíces, evita estas pérdidas. Para ello, debemos evitar los sistemas de riego tradicionales (riego a manta, por surcos, etc) y acudir a sistemas de riego localizado (exudación, micraspersión, goteo) o riego por aspersion.

Ante la importancia del tema, se planteó este trabajo con varios objetivos:

- Determinar la dosis óptima técnica para la variedad estudiada en el ensayo.
- Realizar un estudio de la influencia del sistema de riego y la fertilización nitrogenada sobre la lixiviación de nitrógeno.
- Estudiar el balance de nitrógeno, como método para la recomendación de la fertilización nitrogenada.

2. ANTECEDENTES

2.1 SITUACION ACTUAL DEL MAIZ GRANO

2.1.1 A nivel mundial

La producción de maíz, ha experimentado continuas variaciones hasta el año 2000, a partir del cual, la producción ha ido aumentando, presentando un valor importante de 683,70 millones de toneladas en el año 2004. En el año 2000, se producía un descenso importante de 19 millones de toneladas respecto de 1999, debido a la sequía sufrida por las partes meridionales y centrales de EE.UU. y en la mayor parte oriental de Europa, obteniéndose rendimientos inferiores a lo normal, produciéndose pérdidas de cosechas enteras. Durante la campaña del 2003, la producción de maíz se situó ligeramente por encima de la cosecha de la campaña del 2002. En el año 2004, se produjo un aumento de producción por tercer año consecutivo, siendo la mayor producción que se haya registrado hasta ahora a escala mundial.

La utilización de maíz, de acuerdo a datos de U.S.D.A., ha aumentado de manera continuada a lo largo de estos años, así de 467,90 millones de toneladas en la temporada 1990-1991, se ha llegado a las 751,00 millones de toneladas durante la temporada 2007-2008. Este aumento se debe entre varios factores a envíos de ayuda alimentaria, crecimiento de la población mundial, utilización del maíz para pienso, usos industriales y precios persistentemente débiles.

En la Tabla 1 se muestra la evolución del maíz a escala mundial en los últimos años:

Tabla 1. Balance de producción de maíz a nivel mundial. (miles de toneladas)

Campaña	Producción	Comercio	Consumo	Exist. Finales	Exist. consumo %
1998/99	605,70	68,60	582,30	169,60	29,13
1999/00	607,40	73,40	605,80	171,20	28,26
2000/01	588,40	76,50	607,80	151,60	24,94
2001/02	601,50	75,30	622,10	148,00	23,79
2002/03	601,50	77,50	627,10	122,40	19,52
2003/04	618,90	75,70	646,60	94,60	14,63
2004/05	683,70	77,10	677,80	100,60	14,84
2005/06	695,60	83,10	701,40	124,90	17,81
2066/07	687,20	83,00	725,80	86,40	11,90
2007/08	751,00	84,00	761,00	85,00	11,17

Fuente: Balance de gestión de cereales: MAPA. 2005.

La variación entre producción y utilización del maíz, es decir las existencias mundiales, ha experimentado un continuo descenso desde la campaña 1999-2000, que de acuerdo a FAO, es debida a la disminución de producción mundial de maíz; sin embargo, en la temporada 2005-2006, debido a las excelentes cosechas las reservas mundiales han aumentado, siendo esto positivo para la seguridad alimenticia mundial tras las fuertes reducciones experimentadas durante los últimos 4 años.

En el Gráfico 1 se detalla la evolución del maíz a lo largo de los últimos años:

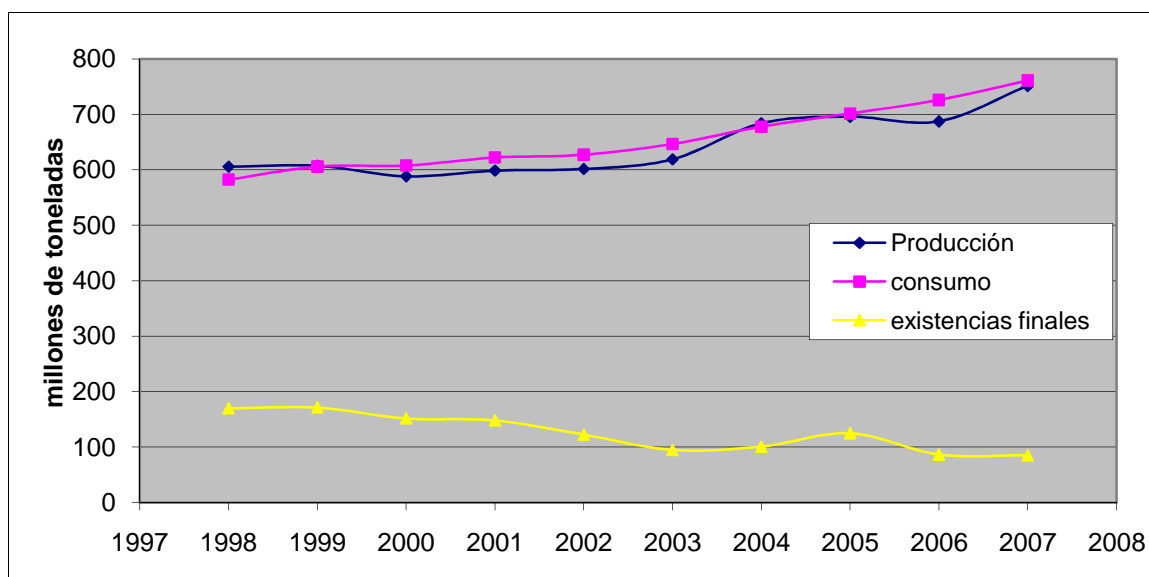


Gráfico 1. Evolución de la producción de maíz a nivel mundial

Fuente: Balance de gestión de cereales 2007 MAPA. Elaboración propia

Es pues habitual que debido a la variación de la relación producción-consumo, los precios se tornen variables, resultando un mercado muy volátil, costando mucho consolidar una tendencia a medio plazo.

Como consecuencia del aumento de cosechas, los precios del maíz durante la campaña las campañas de 1998, 1999 y 2000, continuaron debilitándose; sin embargo una fuerte demanda de importación en medio de una situación de disminución mundial de la producción y de reducción de existencias, hizo que los precios tuvieran una beneficio.

Durante la campaña 2004-2005 el precio del maíz fue de 94 dólares la tonelada, presentando un pequeño incremento debido a una importante recuperación de la cosecha mundial.

Según el informe USDA de enero del 2005, una gran producción de maíz tanto para el mundo como para los EE.UU., limitó las ganancias en los precios, por tanto la posibilidad de nuevas bajas o de persistir unos precios muy bajos como los actuales, seguiría presente debido a un mercado mundial muy ofertado.

Ahora es importante observar el comportamiento de la demanda, que frente a esta situación de los precios, debería reaccionar con fuertes compras, que ocasionarían un alza anual, hasta alcanzar un nivel de 106 dólares por tonelada en próximos años; como reflejo de ello la superficie sembrada tendrá un incremento constante, aumentando la producción.

2.1.2 En España

Los cultivos herbáceos son la alternativa básica de la agricultura española. En 1998 la superficie de regadío era de 1.371.089 hectáreas, de las cuales 403.360 hectáreas correspondían al maíz.

Los rendimientos medios nacionales son de 5,4 t ha⁻¹ en regadío de las cuales el maíz tiene un rendimiento de 7,7 t ha⁻¹; a pesar de ello, estas cifras de rendimientos medios son muy inferiores a las de los demás países comunitarios. Es destacable el hecho de que el único parámetro en el que España destaca es en el rendimiento del maíz de regadío, en donde está a la cabeza de la Unión Europea a pesar de un coste adicional importante derivado del uso del agua y de las técnicas de cultivo necesarios.

A lo largo del año 1998, las condiciones meteorológicas no supusieron graves inconvenientes para el desarrollo de cereales; sin embargo la abundancia de lluvias del último trimestre del año 1997 dificultó la siembra de los cereales de otoño-invierno, lo que supuso la reducción de la superficie ocupada por estos. Las buenas condiciones ambientales a lo largo del periodo de desarrollo, permitieron un aumento generado de la producción. No ocurrió lo mismo con el maíz, que experimentó descensos del 3,7 por ciento en producción y 6,4 por ciento en superficie; así de 489,2 miles de hectáreas sembradas en 1997 se pasaron a 459,1 miles de hectáreas en 1998; así mismo la producción fue de 4349,1 miles de toneladas frente a las 4453,7 miles de toneladas en la campaña de 1997.

En la campaña 1999-2000, la sequía afectó sobre todo a la mitad sur y al este peninsular haciendo que la producción descendiera de manera importante, así la producción de maíz fue de 3.731 miles de toneladas. En la campaña 2001-2002, el sector agrario estuvo marcado por la penalización sufrida en maíz de regadío que fue del 22,4% en toda España; por ello a partir de 2002-2003 en el caso de superarse la superficie base, las penalizaciones se aplicaban en aquellas comunidades que superaran dicha superficie. Al sobrepasarse en más de 55.000 hectáreas la superficie nacional de maíz en regadío, las comunidades de Andalucía, Cantabria, Castilla la Mancha, Castilla y León, Cataluña, Extremadura y Madrid, sufrieron penalizaciones en las ayudas a dicho cultivo, que fueron entre el 23 % y el 3 % del importe de la ayuda; todo ello unido a unas altas temperaturas durante todo el ciclo vegetativo y unido a un régimen insuficiente de lluvias, provocó el descenso de la cosecha de maíz, que fue de 4.463 miles de toneladas.

En la campaña 2004-2005, los problemas generados por la importante sequía del invierno que sufrió el país, la mayor de los últimos 15 años, generó pérdidas de producción comprendidas entre el 20 y el 30 %.

En el 2009 se refleja a escala nacional un descenso importante de las superficies de cereales, en maíz el descenso fue de un 3 %. La superficie sembrada fue inferior a otras campañas debido a los precios de los inputs agrícolas al comienzo de las siembras. Las condiciones climáticas a lo largo de la campaña 2008-09 con un invierno y primavera caracterizados por la sequía en las

principales zonas cerealistas de España produjo unos bajos rendimientos debido a la escasez de agua teniendo en cuenta que la campaña 2007-08 fue excelente.

En la Tabla 2 se presentan los datos de superficie, rendimiento, producción, valor y comercio exterior del cultivo estos últimos años:

Tabla 2. MAÍZ: Serie histórica de superficie, rendimiento, producción, valor y comercio exterior.

Campaña	Superficie	Rendimiento	Producción	Precio medio	Import.	Export.
1998/99	459,1	94,7	4349,1	13,79	2.733.154	176.077
1999/00	349,9	94,5	3731,0	14,08	3.045.421	98.817
2000/01	433,1	92,2	3991,8	14,33	3.629.845	77.546
2001/02	512,5	97,2	4981,9	13,64	2.829.648	166.244
2002/03	461,5	95,1	4425,4	13,70	3.555.711	127.312
2003/04	476,1	91,5	4355,7	14,79	3.936.591	127.312
2004/05	479,8	100,7	4831,1	14,67	2.775.082	187.902
2005/06	414,3	96,1	3981,4	13,50	4.275.611	113.204
2006/07	344,4	97,4	3355,7	15,19	4.333.228	114.717

Fuente: Anuario de estadística agraria 2007.MAPA

Superficie: miles de ha.

Rendimiento: qm ha⁻¹.

Producción: miles de t.

Precio medio: euros 100kg⁻¹

Importación: miles de toneladas.

Exportación: miles de toneladas.

2.1.3 En Navarra

El espacio agrario configura el paisaje de la mayor parte del territorio navarro. La superficie agrícola utilizada, supone el 59.3 % de los aproximadamente 10.400 km² de la provincia.

El cereal estrella en los regadíos navarros es el maíz, que cubre unas 11.800 hectáreas, fundamentalmente en las vegas del bajo Aragón, Arga, Ebro y Queiles, donde obtiene unos altos rendimientos medios que oscilan en torno a los 8.000 kg ha⁻¹. En el 2001 se cultivaron más de 1.000 hectáreas en municipios como Villafranca, Tudela y Valtierra. Después de protagonizar una gran expansión tras la incorporación de España en la C.E.E., la superficie destinada a maíz se ha estacionado o retrocedido en beneficio de la alfalfa y del girasol, así 15.332 eran las hectáreas dedicadas al maíz de regadío en 1990 y 11.925 en el 2002.

La producción de maíz a lo largo de estos últimos 15 años ha presentado continuas oscilaciones, pero tales oscilaciones no coinciden con las variaciones de superficie cultivadas en estos años, lo que lleva a la conclusión, de que la producción de este cultivo viene influenciada principalmente por la climatología de cada campaña. Así por ejemplo en la campaña 2002 los rendimientos obtenidos fueron mediocres, influenciados por la reducción de la superficie dedicada al cultivo de maíz y unido a un verano fresco que impidió que el cultivo expresara su potencial productivo. En la campaña 2003, los rendimientos

obtenidos fueron malos, estimándose mermas de producción cercanas al 20 %, lo que refleja los problemas de implantación del cultivo y el estrés sufrido por el exceso de calor. En 2006 se cultivaron 10.189 ha, lo que supuso el 83,5% respecto a la campaña pasada. El cultivo cayó hasta el punto más bajo de superficie sembrada en los últimos 20 años. En 2007 se cultivó un 20 % más respecto al año anterior impulsado por la fuerte subida de los precios del grano.

En la Tabla 3 se muestra la producción de maíz en Navarra durante los últimos años:

Tabla 3. Producción de maíz en Navarra

Año	Producción (Tm)	Superficie (ha)
2000	118.509	14.160
2001	129.005	15.598
2002	98.730	11.925
2003	118.426	15.187
2004	117.887	15.315
2005	99.027	12.087
2006	88.367	10.189
2007	113.828	12.090
2008	136.180	14.137
2009	128.357	12.541

Fuente: Negociado de Estadística Agraria y Estudios Agrarios. Departamento de Desarrollo Rural y Medio Ambiente. Elaboración propia.

2.2 CICLO VEGETATIVO DEL MAIZ

El rendimiento del maíz está determinado principalmente por el número final de granos logrados por unidad de superficie, el cual es función de la tasa de crecimiento del cultivo alrededor del periodo de floración (Andrade *et al.*, 1996). Para ello debe alcanzar un óptimo estado fisiológico en floración, cobertura total del suelo y una alta eficiencia de conversión de la radiación interceptada en biomasa. Tanto el crecimiento foliar adecuado como la alta eficiencia de conversión de radiación interceptada se ven aseguradas con una buena disponibilidad de nutrientes, especialmente a partir del momento en el que los nutrientes son requeridos en mayores cantidades (aproximadamente cuando el cultivo tiene entre 5 y 6 hojas desarrolladas). El conocimiento del proceso del crecimiento vegetativo así como reproductivo, proporciona los medios necesarios para optimizar la cosecha de maíz.

El cultivo de maíz tiene un ciclo que comprende cinco periodos fundamentales que son: nascencia, crecimiento, floración, fructificación y maduración-secado. Así mismo existe un sistema muy utilizado denominado “Sistema Iowa”, que divide el ciclo del cultivo en etapas vegetativas (V) y etapas reproductivas (R).

Las etapas vegetativas se designan numéricamente como V1, V2, V3...., hasta Vn, donde n representa el estado anterior a la emergencia de la mazorca (Vt). Los seis estados reproductivos se designan numéricamente. Así pues, el ciclo del maíz se define como sigue:

2.2.1 Nascencia

Es el periodo comprendido entre la siembra y la aparición del coleóptilo. Tras la siembra y siempre que temperatura y aireación sean las correctas y el grado de humedad sea el óptimo (la semilla debe contener por lo menos la humedad del 30 %), la semilla iniciará la germinación apareciendo a los dos o tres días la radícula y a los cuatro o seis la plúmula. Este periodo corresponde a la etapa vegetativa VE.

En la etapa VE se determina el potencial de producción de la planta, por lo tanto se trata de una de las etapas críticas del maíz. Se desarrollan de 6-7 raíces seminales, que proporcionan a la planta sustancias minerales disueltas en el suelo y a la vez cumplen funciones de sostén hasta que empiezan a formarse las raíces principales a partir de la corona. La plúmula crece hacia la superficie defendida por el coleóptilo, apareciendo las primeras hojas a los 8-10 días de la siembra. La planta de maíz requiere nitrógeno tras la germinación para iniciar un crecimiento óptimo, por tanto una disponibilidad inadecuada de este nutriente puede dar lugar a potenciales reducidos de producción (Jones, 1985).

2.2.2 Crecimiento

Tras la nascencia comienza la etapa de crecimiento, en la que aparece una hoja cada tres días si las condiciones son buenas. A partir de la corona (punto de crecimiento cercano a la superficie unido a la semilla por el mesocotilo), aparecen las raíces principales que dan lugar a un sistema radicular fasciculado. También a partir de la corona se desarrollan las hojas, pasando de las 5 hojas embrionarias a 15-30 hojas definitivas.

De acuerdo al sistema Iowa las fases comprendidas entre V1 y V13 se incluirían dentro de este periodo. La tasa de absorción de nitrógeno es baja en los estados iniciales de desarrollo hasta V5-V6 (estado de 5-6 hojas desarrolladas según Ritchie *et al.*, 1993). A partir de V5-V6, la tasa de absorción de nitrógeno se incrementa de manera importante. Puesto que el sistema de la raíz es relativamente pequeño y el suelo está fresco, concentraciones altas de fertilizante nitrogenado estimulan el crecimiento vegetal, sin embargo las cantidades de nutrientes requeridos son relativamente pequeñas. Las malas hierbas compiten por el agua, nutrientes y luz. La aplicación de tratamientos fitosanitarios puede reducir la presión de la mala hierba y así limitar la competencia a la cosecha de maíz.

Tres semanas después de la nascencia comienza la etapa V6. Se distribuye en el suelo el sistema de la raíz. En este momento la planta absorbe en mayor cantidad los nutrientes, así que es beneficioso el uso de fertilizantes. Es otra de las etapas críticas para el cultivo; la eficacia de absorción del nitrógeno aplicado durante las etapas comprendidas entre V6 y V10 así como la absorción del nitrógeno aplicado en presembrado han sido estudiados en muchos trabajos (Welch *et al.*, 1971; Jung *et al.*, 1972; Alley *et al.*, 1997; Sims *et al.*, 1998).

Cuatro semanas después de emerger la planta comienza la etapa V8; en este periodo pueden presentarse deficiencias que pueden ser corregidas con fertilizantes foliares, especialmente si son aplicados antes de que aparezcan en el cultivo los primeros síntomas de deficiencia. Las deficiencias nutricionales restringen seriamente el crecimiento de la hoja. El riego permite una mejor distribución del nitrógeno en el suelo y optimiza la disponibilidad del nitrógeno en estadios posteriores a V8 pero a su vez genera un riesgo de pérdida de nitrógeno por lixiviación.

Cinco semanas después de la nascencia de la planta comienza la etapa V10; en esta etapa la planta de maíz comienza un aumento constante y rápido en acumulación de nutrientes y materia seca. Si las condiciones son buenas aparece una nueva hoja cada tres días. Las deficiencias de humedad y nutrientes afectarán al crecimiento y desarrollo de las mazorcas. El cultivo de maíz comienza la absorción de nitrógeno de forma rápida a partir de la mitad del ciclo vegetativo, con una absorción máxima en el momento de la aparición de las sedas (Hanway, 1963). Así, la aplicación de fertilizante nitrogenado en cobertura entre las etapas V8 y V10 es una de las mejores maneras de suministrar el nitrógeno en esta etapa vegetativa.

Seis semanas tras la nascencia de la planta comienza la etapa V12. El número de óvulos en cada mazorca se determinará y pueden verse afectados de forma importante por el estrés. Deficiencias nutricionales reducirán el número de óvulos en las mazorcas.

En el momento en que asoma el penacho, se puede considerar que ha terminado la fase de crecimiento.

2.2.3 Floración

Tras la formación de la panoja, la planta necesita entre 4 y 6 semanas para iniciar la floración (liberación del polen y alargamientos de los estilos). Durante las tres semanas previas a la floración y las dos posteriores a la misma, la planta desarrolla su máxima actividad fotosintética, demandando sus máximas necesidades en agua y nitrógeno. Este periodo comprende los estadios comprendidos entre V14 y R1. Es el periodo más crítico, pues se determina la producción de semillas, el número de óvulos que desarrollan las sedas, así como el número de núcleos. En esta etapa comienza la aparición de las sedas. Si en estos momentos se producen deficiencias nutricionales en el cultivo, éstas causarán daños importantes que se traducirán en una merma importante de la

producción. Dentro del periodo de floración es importante destacar la etapa R1, que comienza cuando las sedas son visibles u ocurre la polinización; ésta se produce cuando los granos de polen entran en contacto con las sedas nuevas y húmedas. La liberación del polen empieza algo después de que las flores masculinas hayan sido impulsadas fuera del verticilo foliar, debido al alargamiento de los últimos entrenudos superiores del tallo. Estos granos de polen producidos en la inflorescencia masculina llevados por el viento, pueden fecundar a varias espigas femeninas. El polen es expulsado generalmente desde las primeras horas del día hasta media mañana. El rocío de la noche y la primera luz del día, facilitan la dehiscencia de las anteras y la propagación del polen. La máxima producción de polen se produce al tercer día de la dehiscencia. Esta liberación del polen suele durar entre 6 y 8 días, y la cantidad es más que suficiente para fecundar todas las espigas de la plantación. Por término medio una planta puede producir 25 millones de granos de polen. En caso de que la sequía o temperaturas extremas lleguen a dañar muchas flores masculinas, la escasez de polen puede ser causa de una cosecha deficiente.

Los óvulos de las flores femeninas producen estilos alargados terminados en estigmas. Su aspecto es el de sedas o pelos coloreados que sobresalen en forma de cabellera por el extremo de la espiga o mazorca. Los estilos empiezan a salir de las brácteas que envuelven las espigas femeninas, unos dos o tres días después de que empezaran a liberar el polen las flores masculinas, de forma que el final de la liberación del polen, coincide aproximadamente con la aparición de los últimos estilos.

Esta coincidencia no es funcional para la misma planta, ya que el porcentaje de fecundaciones de polen con espigas del mismo pie de planta es muy escaso (3%). En el 97% de los casos se producen fecundaciones cruzadas entre el polen de unas plantas y las espigas de otras distintas.

Es la etapa más crítica del ciclo del maíz en cuanto a fertilización nitrogenada se refiere. Una aplicación de fertilizante nitrogenado realizado previamente a esta etapa R1, genera una respuesta importante del cultivo. Estudios sobre aplicaciones de nitrógeno entre coberteras y las etapas VT o R1, han mostrado unos rendimientos muy altos del cultivo, siempre que la deficiencia de nitrógeno, no se presente antes de estas aplicaciones tardías (Rasd and Stanley, 1981; Evanlyo, 1991; Binder *et al.*, 2000).

2.2.4 Fructificación

Comprende las etapas R2, R3, R4 y R5.

La etapa R2 comienza con la fecundación del óvulo por el polen. Una vez realizada la fecundación, las sedas se marchitan tomando un color castaño oscuro. A los 6-8 días tras la polinización, aparecen sobre la mazorca unos pequeños granos con aspecto de pequeñas gotas de agua, que son los granos en formación.

La etapa R3 comienza alrededor de 20 días tras la aparición de las sedas. Los granos se llenan de una sustancia rica en azúcares y la humedad del grano esta cerca del 80%.

La etapa R4 comienza alrededor de 26 días después de la aparición de las sedas. La consistencia del grano es ahora pastosa. Los granos han acumulado el 50% de su peso seco y tienen una humedad cercana al 70%. Unas condiciones ambientales desfavorables o deficiencias nutricionales pueden dar lugar al mal llenado de los granos y mazorcas “chaffy” (mazorcas espiciformes).

La etapa R5, comienza 35 días después de la salida de las sedas, en la que el embrión de la semilla es morfológicamente maduro y la acumulación de la materia seca cesará pronto.

2.2.5 Maduración y secado

8-9 semanas después de la polinización, el grano ha alcanzado su peso seco máximo y se encuentra en estado de madurez fisiológica. Este estado se denomina R6. Para reconocer el momento de la madurez fisiológica, puede observarse la base del grano, es decir la parte por la que se une a la mazorca. El grano que ha madurado transforma en almidón y proteína sus sustancias de reserva y tienen en la base una zona callosa negruzca “punto negro”. En ese momento, el contenido de humedad del grano es del orden del 30-35%. Desde ese momento la maduración comercial de las espigas y el grano, es sólo un problema de pérdida de humedad. La recolección se realiza cuando el grano alcanza el 25% de humedad.

2.3 CICLO DEL NITROGENO

El Nitrógeno es el elemento básico para la síntesis de los constituyentes orgánicos más importantes de la planta. Es el componente esencial de aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos, aminos, amidas, nucleoproteínas, clorofila, etc. Es absorbido por las raíces generalmente bajo las formas NO_3^- (nitrato) y NH_4^+ (amonio) (Mengel, 1991). La forma nitrato es la forma dominante porque en general se encuentra en cantidades superiores al amonio. La preferencia de las plantas por absorber amonio o nitrato está determinada por el estado fenológico, tipo de planta y medio ambiente. El contenido de nitrógeno en los suelos varía en un amplio espectro, pero valores normales para la capa arable son del 0,2 al 0,7 %. Estos porcentajes tienden a disminuir con la profundidad. El nitrógeno tiende a incrementarse al disminuir la temperatura de los suelos y al aumentar las precipitaciones atmosféricas.

En el suelo podemos encontrar el nitrógeno en dos formas:

1. Nitrógeno orgánico: compone la mayor parte del nitrógeno total. Los valores normales están comprendidos entre 90-95% y puede encontrarse en organismos vivos (plantas y animales), residuos orgánicos (MOL) o humus estable (MOS). Se encuentra siempre en forma reducida, gran parte en forma de grupos amino (NH_2^-). Las formas de nitrógeno orgánico llegan al suelo en forma reducida y en el suelo pueden ser inmovilizadas por los microorganismos o pueden ser oxidadas a formas de nitrógeno inorgánico llamado también nitrógeno mineral. Este nitrógeno puede ser fijado por las arcillas del suelo, absorbido por los microorganismos, transformado en gas o perdido por lixiviación.

2. Nitrógeno inorgánico: puede encontrarse en la atmósfera del suelo como NH_3 , N_2 , NO y N_2O en constante difusión con la atmósfera libre o en la solución del suelo como NO_3^- y NH_4^+ . El nitrato y el amonio disueltos en la solución del suelo, pueden ser tomados directamente por las raíces de la planta (Mengel, 1991). La temperatura y el pH del medio radicular afectan de diferente forma la absorción de ambos tipos de iones.

Se han encontrado en varias especies de cultivos que incrementos en el pH promueven la absorción del amonio, mientras que una reducción del mismo favorece la absorción del nitrato (Cao y Tibbits, 1994). En general, un medio nutritivo con un pH de 4.5 a 6.0 se considera óptimo para la absorción de NO_3^- , mientras que un pH de 6.0 a 7.0 se considera el óptimo para el NH_4^+ (Hageman, 1992).

El NO_3^- por su elevada movilidad en el suelo, debido a que no es adsorbido por los coloides y a que sus sales son solubles, se transporta hasta alcanzar los pelos radiculares por mecanismos de flujo de masa o por difusión.

El NH_4^+ presente en la solución del suelo se transporta solamente por difusión y se encuentra en equilibrio con el NH_4^+ adsorbido por los coloides del suelo. En suelos bien aireados, la cantidad de NH_4^+ de la solución del suelo es muy baja. Sin embargo en suelos arcillosos la cantidad de amonio es muy elevada. Como estos suelos arcillosos se presentan con relativa frecuencia en regiones aptas para el cultivo, la asimilabilidad del NH_4^+ requiere una atención particular, ya que en ocasiones puede ser más importante para la nutrición del cultivo que el NO_3^- . El amonio debido a sus propiedades catiónicas, es fuertemente adsorbido por arcillas minerales cargadas negativamente, tales como la illita, vermiculita y montmorillonita (Mengel y Kirkby, 1987).

El nitrógeno en el suelo está sujeto a un conjunto de transformaciones y procesos de transporte que se denomina **Ciclo del nitrógeno**.

Los principales componentes y elementos del ciclo del nitrógeno en el suelo que conviene considerar se muestran en la Figura 1:

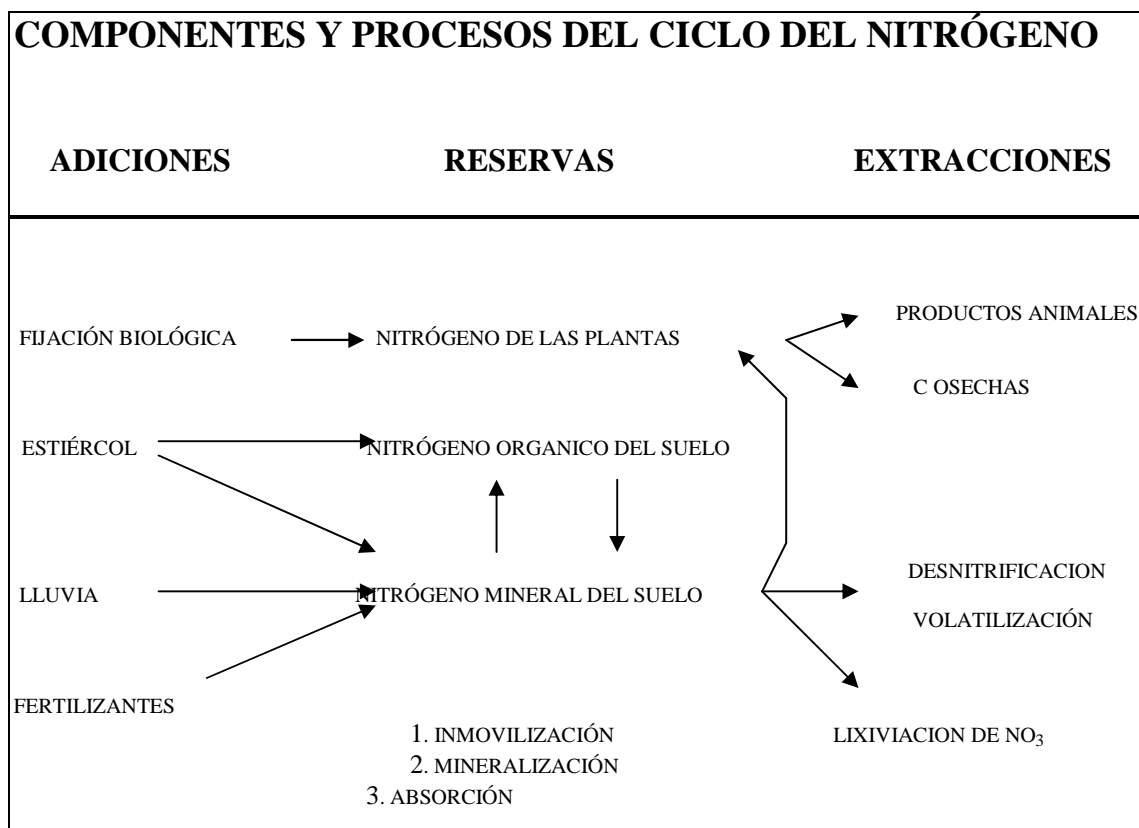


Fig1. Componentes y procesos del ciclo del nitrógeno
 Fuente: HOJA DIVULGADORA nº 7/92 HD/MAPA

2.3.1 Absorción de nitrógeno por la planta

La absorción del nitrógeno por la planta constituye una de las partes más importantes del ciclo del nitrógeno en los suelos agrícolas. Epstein (1972), Mengel y Kirby (1987), Jingquam y Deweien (1988), Hageman (1992), Salisbury y Ross (1992) y Maldonado (1993) documentaron ampliamente que las plantas pueden utilizar tanto la forma nítrica como la forma amoniacal. Esta absorción es la que el agricultor debe optimizar para conseguir una óptima producción y un beneficio económico. Finalmente el nitrógeno absorbido por las raíces de las plantas es traslocado en el xilema a las partes superiores de la planta. La forma en la cual el nitrógeno es transportado depende de la fuente de nitrógeno absorbida y del metabolismo de la raíz.

2.3.2 Extracción por la cosecha

Del nitrógeno absorbido por la planta, una parte vuelve al suelo después de la cosecha en forma de residuos (raíces, tallo y hojas) y puede ser utilizado por los cultivos siguientes; otra parte se extrae del campo con la cosecha. Existen datos de la extracción aproximada de nitrógeno por las cosechas, pero estos valores no pueden emplearse directamente para el cálculo de la cantidad de abono necesario para cada cultivo, sin conocer la *eficiencia de utilización del nitrógeno fertilizante* (NUE). Este término es definido en general, como la relación entre el nitrógeno absorbido por el cultivo y la cantidad de nitrógeno suministrado (e.g., Liang and Mackenzie, 1994).

Esta eficiencia es variable en diferentes situaciones. La extracción de nitrógeno por la cosecha sólo da una idea de las necesidades mínimas de nitrógeno que requiere un cultivo.

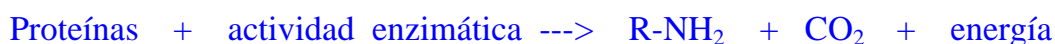
2.3.3 Mineralización e inmovilización

La mineralización es la transformación del nitrógeno orgánico en formas inorgánicas (NH_3 ó NH_4^+) mediante la acción de los microorganismos del suelo (Jansson and Persson, 1982). La población de microorganismos heterótrofos del suelo está compuesta de numerosos grupos de bacterias y hongos, cada uno de los cuales es responsable de uno o más pasos en las numerosas reacciones llevadas a cabo en la descomposición de la materia orgánica.

La mineralización del nitrógeno orgánico contribuye de manera importante a la acumulación de nitrógeno en el suelo y a la disponibilidad del nitrógeno por parte de la planta (Kolberg *et al.*, 1997). Este proceso se realiza mediante tres reacciones que son: aminización, amonificación y nitrificación. Las dos primeras son llevadas a cabo por microorganismos heterótrofos y la última por microorganismos autótrofos. En zonas templadas, una cantidad del 1 al 4% del nitrógeno orgánico es convertida mediante estas reacciones en formas de nitrógeno mineral, las cuales son utilizadas por las plantas.

2.3.3.1 Aminización

Es una de las últimas fases en la descomposición de materiales nitrogenados. Es la descomposición hidrolítica de las proteínas y la producción de aminas y aminoácidos. Es la primera reacción que se lleva a cabo en el proceso de la mineralización. Se representa esquemáticamente como:



2.3.3.2 Amonificación

Los aminoácidos y aminas producidos en la aminización son utilizados por otros microorganismos que posteriormente producirán compuestos amoniacales. Una gran cantidad de bacterias, hongos y actinomicetes son capaces de liberar amonio. El proceso se representa de la siguiente forma:



El amonio producido puede seguir varios caminos:

- parte ser convertido en nitritos y nitratos mediante el proceso de nitrificación.
- parte ser absorbido por plantas superiores.
- parte ser utilizado por organismos heterótrofos en la futura descomposición de residuos orgánicos.
- parte ser fijado en la estructura de arcillas expandibles.
- parte ser lentamente incorporado a la atmósfera.

2.3.3.3 Nitrificación

Es la última fase del proceso de la mineralización. Es el proceso mediante el cual el amonio se transforma primero en nitrito (NO_2^-) y éste posteriormente en nitrato (NO_3^-) mediante las bacterias aerobias del suelo. El proceso se lleva a cabo en dos etapas coordinadas, controlada cada una de ellas por diferentes grupos de bacterias. La conversión de compuestos amoniacales en nitritos es llevada a cabo por las Nitrosomonas. Las Nitrosomonas pueden considerarse como el grupo de microorganismos más importante responsable de la conversión del amonio (NH_4^+) a nitrito (NO_2^-).

La reacción se representa de la forma:



Existe también un número de microorganismos heterótrofos que pueden convertir compuestos nitrogenados a nitrito. Estos microorganismos incluyen bacterias, actinomicetes y hongos. Los sustratos utilizados además del amonio, son algunas aminas, amidas, hydroxylaminas y otros compuestos.

La conversión de nitrito a nitrato es la segunda etapa de la nitrificación y es llevada a cabo por otro grupo de bacterias denominadas Nitrobacter. La ecuación que representa esta reacción es la siguiente:



Normalmente el nitrito se transforma en nitrato con mayor rapidez que con la que se produce, con lo cual los niveles de nitrito suelen ser muy bajos en

comparación con las de nitrato. Bajo condiciones adecuadas la nitrificación puede transformar del orden de 10-70 kg ha⁻¹ y día. Existen una serie de factores que afectan a la nitrificación:

- cantidad de amonio en el suelo
- pH del suelo.
- población de microorganismos
- aireación: los microorganismos que llevan a cabo la nitrificación son estrictamente aerobios, por eso en condiciones de encharcamiento no se lleva a cabo el proceso de la nitrificación.
- humedad del suelo: siendo la óptima la capacidad de campo
- temperatura: la óptima está comprendida entre 20 y 35° C.

El proceso de inmovilización es el proceso contrario, es decir, aquel mediante el cual se produce la conversión de nitrógeno inorgánico a orgánico (Jansson and Persson, 1982). Como ambos procesos actúan en sentido opuesto, su balance se denomina *mineralización neta*. La mineralización neta depende de muchos factores entre ellos el contenido en materia orgánica, humedad y temperatura del suelo.

Un factor importante en la mineralización de la materia orgánica que se añade al suelo es su relación C/N, que indica la proporción de carbono (C) a nitrógeno (N). Generalmente cuando se añade materia orgánica al suelo con una relación C/N entre 20 y 25 o de un valor inferior, se produce una *mineralización neta*, ya que en el suelo hay NH₄⁺ y NO₃⁻ disponible. Los microorganismos utilizan el amonio ya que su asimilación es más eficiente. Sin embargo si la relación C/N tiene valores superiores a los anteriores, la materia orgánica que está siendo descompuesta no tiene suficiente nitrógeno para atender las demandas de los microorganismos, y estos, inmovilizan nitrógeno mineral del suelo produciéndose entonces una *inmovilización neta*. La relación C/N de la capa arable del suelo suele estar comprendida entre valores de 10 y 12.

2.3.4 Desnitrificación

La desnitrificación consiste en una reducción parcial o completa del nitrato obteniendo como resultado nitrógeno gaseoso (N₂) y óxidos de nitrógeno que pasan a la atmósfera. Es la causa más importante de pérdida de eficiencia de los fertilizantes y la mayor fuente de producción de óxidos de nitrógeno, los cuales se comportan como gases de efecto invernadero (Watson *et al.*, 1990), produciendo la destrucción del ozono estratosférico (Crutzen, 1981). Además es responsable de la pérdida de una importante cantidad de nitrógeno del suelo. Sin embargo y a pesar de los efectos negativos, actualmente se le da importancia significativa ya que puede ser utilizada para disminuir la cantidad de nitratos de aguas residuales o efluentes agrícolas.

Existen una serie de factores que afectan a la desnitrificación como la temperatura. Otro factor a tener en cuenta es el valor del pH. Unos valores bajos de pH aumentan la proporción de gases emitidos a la atmósfera como N₂O con respecto al N₂.

2.3.5 Volatilización

Se denomina así la emisión de amoniaco gaseoso desde el suelo a la atmósfera. El amonio del suelo reacciona en medio alcalino, formando amoniaco que puede volatilizarse a la atmósfera. El tipo de suelo y otros factores, afectan a la cantidad de nitrógeno perdido por el proceso de la volatilización, incluyendo además pH del suelo, capacidad de intercambio catiónico, materia orgánica contenida en el suelo, cantidad y tipo de residuos, humedad del suelo, temperatura y fuentes de nitrógeno. La reacción que representa este proceso es la siguiente:



La reacción es química, lo que quiere decir que no está mediada por microorganismos. Se ve favorecida por condiciones de alcalinidad y temperaturas altas. La acumulación de residuos de cosecha incrementa la cantidad de humedad del suelo, favoreciendo el proceso de la volatilización (Bandel *et al.*, 1980).

Aunque puede haber pérdidas por volatilización cuando se abona con amoniaco anhidro, resultan más frecuentes aquellas que ocurren cuando se emplean abonos nitrogenados en forma amónica en suelos alcalinos, sobre todo si el pH es superior a 8.

Estas pérdidas han sido observadas cuando los fertilizantes amoniales son aplicados en superficie (Seller and Mengel, 1986).

La urea puede experimentar también pérdidas visibles después de transformarse en abono en el suelo. Los estiércoles, si no se incorporan al suelo, pueden perder del orden del 10 al 60% de su nitrógeno por volatilización debido a que una parte importante de su nitrógeno suele estar en forma amónica.

2.3.6 Fijación biológica

Consiste en la incorporación del nitrógeno gaseoso de la atmósfera.

Esta fijación puede ser simbiótica, la cual constituye la mayor parte de la síntesis del nitrógeno atmosférico. Es realizada por las bacterias del género *Rhizobium* en asociación simbiótica con plantas de la familia de las Leguminosas. La cantidad de nitrógeno fijado por cultivos de leguminosas varía entre 50 y 200 kg N ha⁻¹ año⁻¹.

La fijación puede ser también no simbiótica y ésta suele ser llevada a cabo por las bacterias Azotobacter, Beijerinckia, Clostridium y Aerobacter, todas ellas heterótrofas. Son generalmente mucho menos eficientes que Rhizobium en la fijación del nitrógeno.

La cantidad fijada puede variar entre 7 y 30 kg N ha⁻¹año.

2.3.7 Aportaciones por lluvia

La lluvia contiene cantidades variables de nitrógeno en forma de amonio, nitrato y óxidos de nitrógeno y constituye una fuente importante de nitrógeno en los sistemas naturales. Sin embargo, en los sistemas agrícolas este aporte de 5 y 15 kg N ha⁻¹ y año es pequeño respecto al de los fertilizantes.

2.3.8 Lixiviación

La lixiviación o lavado del nitrato es el arrastre del mismo por el agua del suelo que percola más abajo de la zona radicular. Las pérdidas por lixiviación pueden llegar a ser muy importantes y no sólo constituyen una pérdida de eficiencia del fertilizante nitrogenado, sino que además puede contaminar aguas subterráneas y superficiales. Kaluli *et al.*; 1999, observaron que en zonas húmedas provistas de drenaje incrementaba la lixiviación de nitratos.

2.3.9 Escorrentía

La escorrentía del agua en los suelos agrícolas, es el flujo del agua sobre la superficie del suelo de modo que no se infiltra en el campo, sino que fluye normalmente hacia terrenos más bajos o cursos superficiales de agua. Se produce debido a lluvias o riegos excesivos y puede arrastrar cantidades variables de nitrógeno. La mayor cantidad del nitrógeno en forma de amonio de los campos agrícolas de zonas húmedas se descarga, por lo general con las aguas de escorrentía (Bockholt *et al.*, 1991; Harris y Parish, 1992; Adentunji, 1994).

En general estas pérdidas son pequeñas excepto cuando la escorrentía se produce poco después de un abonado.

2.4 LIXIVIACIÓN DE NITRATOS

Lograr una agricultura sostenible plantea un dilema importante, en donde el objetivo de obtener unos altos rendimientos en los cultivos contrasta con la necesidad de reducir el deterioro ambiental que se genera en el proceso productivo. Un manejo racional de los nutrientes que se agregan, permite lograr óptimos niveles de producción y al mismo tiempo minimizar el impacto ambiental. Tradicionalmente, la investigación y desarrollo en el uso de fertilizantes se concentraba en maximizar el beneficio económico a partir de un determinado nivel de fertilizante; actualmente, el interés se centra en minimizar los efectos potencialmente adversos provocados por el uso de los fertilizantes.

Si se pretende alcanzar sistemas de producción sostenibles, adquiere una importancia vital llevar a cabo un manejo racional del fertilizante. La forma de lograr esta optimización es realizando un plan de fertilización (fertilizante, dosis, tecnología de aplicación, momento de aplicación etc.), que permita maximizar el aprovechamiento de los nutrientes esenciales y al mismo tiempo reducir al mínimo las pérdidas de estos nutrientes fuera del sistema suelo-planta. Por ello es fundamental conocer con la mayor precisión los factores que afectan cada mecanismo de pérdida de nutrientes y a partir de ello realizar estrategias de fertilización que minimicen la incidencia negativa de los mismos.

El nitrógeno es el macronutriente esencial que requiere la mayor atención en términos de reducción de sus pérdidas del sistema suelo-planta. El problema ambiental más importante relativo al ciclo del nitrógeno, es la acumulación de nitratos en el subsuelo, pudiendo ser arrastrados hacia los cauces y aguas subterráneas. El nitrato (NO_3^-) es el contaminante más común en aguas superficiales y según Hallberg (1989) la agricultura es la mayor fuente antrópica de nitratos en los acuíferos.

Los cultivos reciben cantidades muy elevadas de abonado nitrogenado y son poco eficientes en el uso de este nitrógeno, por lo que representan un papel importante en la contaminación por nitratos.

El nitrato (NO_3^-) es soluble en agua y sólo es retenido por la fase sólida del suelo mientras lo sea el agua, por lo que puede lixiviarse fácilmente y alcanzar las capas de agua subterránea pudiendo permanecer allí por décadas (Nolan, 1999). El origen de estos nitratos es variado, pudiendo provenir tanto de fuentes localizadas como no localizadas.

Las fuentes no localizadas son todas aquellas en donde no existe un punto fijo de entrada de los contaminantes al sistema (Ongley, 1997), como es el caso de la agricultura, una de las actividades humanas que más contribuye a la contaminación con nitratos. El aporte de nitratos en el suelo bajo agricultura puede provenir tanto de la mineralización del nitrógeno orgánico (humus, estiércol, etc), como del agregado por los fertilizantes nitrogenados. En muchos estudios se ha constatado el potencial contaminante de la agricultura, observándose una relación positiva entre el aumento de la actividad agrícola y la contaminación de aguas por nitratos (Weil *et al.*, 1990; Bauder *et al.*, 1993; Lucey y Goolsby, 1993; Richards *et al.*, 1996).

Las fuentes de contaminación localizada, son generalmente restos orgánicos de origen humano o animal (Weil *et al.*, 1990; Lowrance, 1992; Bauder *et al.*, 1993; Lucy y Goolsby, 1993; Seigley *et al.*, 1993; C.Baker *et al.*, 1995; Drury *et al.*, 1996; Richards *et al.*, 1996; Hénero *et al.*, 1997). Según Ongley (1997), el dilema es determinar la importancia de la agricultura en comparación con las fuentes localizadas. Cuando la importancia y la intensidad de la agricultura comienzan a aumentar deben implantarse además medidas de control agrícola.

Además del nivel de aporte de nitrato, existen otros factores que pueden variar el contenido de nitratos del agua subterránea. Contenidos bajos de oxígeno (O_2) disuelto en agua y abundante presencia de materia orgánica en la misma, crean condiciones favorables para la desnitrificación, proceso en el que las bacterias anaerobias facultativas utilizan el nitrato como fuente de energía perdiéndose parte del nitrógeno en forma gaseosa (N_2O , N_2). Las deficiencias de oxígeno (O_2), también inhiben el proceso de formación de nitratos a partir del amonio. Por lo tanto, ambos procesos determinan una disminución del nitrato en las aguas subterráneas (Nolan B, 1999).

2.4.1 Fertilización nitrogenada y lixiviación de nitratos

En muchas zonas del mundo, la contaminación de las aguas subterráneas por nitratos ha sido atribuida a la excesiva aplicación de fertilizantes nitrogenados (Weil *et al.*, 1990; Meisinger and Randall, 1991; Schepers *et al.*, 1991; Kessebalou *et al.*, 1996; Moreno *et al.*, 1996). La intensificación en el uso del terreno requiere altos aportes de fertilizantes nitrogenados, lo que implica en el caso de no existir una sincronización con la demanda del cultivo, un riesgo elevado de contaminación por nitratos (Adiscott *et al.*, 1991).

La concentración de nitratos en aguas de drenaje y subterráneas durante el periodo de riego (Marzo a Septiembre), excede los $11.3 \text{ mg l}^{-1} \text{ NO}^{-3}$ (Ferrer *et al.*, 1997), que excede el máximo nivel permitido por la Unión Europea (EU Nitrates Directive 91/676/ECC) y ello refleja un exceso de nitrógeno en el medio.

La fertilización nitrogenada en cultivo de maíz es la mayor fuente de nitrógeno o entrada de nitrógeno en el Valle del Ebro (Ferrer, 1999), con aplicaciones de valores medios de 300 kg N ha^{-1} que superan las necesidades del cultivo (Villar *et al.*, 1994; Ballesta and Lloveras, 1996; Domingo *et al.*, 1996).

La dosis, forma y distribución de las aplicaciones de fertilizantes varían mucho en función de las condiciones edáficas y climáticas, el manejo del cultivo y objetivos de la producción. En algunos casos se realiza una aplicación de fondo antes de la plantación, pero mayoritariamente se recomienda el fraccionamiento de la fertilización nitrogenada en varias aportaciones durante el cultivo (Gunasena y Harris, 1971; Errebhi *et al.*, 1998). En el caso del maíz, la estrategia de fertilización es como sigue: en la aplicación de fondo se aportará 1/5 de la dosis total del nitrógeno en forma amoniacal, nítrico-amonioureaica. En cobertera se aplicarían los 4/5 restantes. El maíz como otros cultivos muy exigentes en

nitrógeno, hacen que la problemática de contaminación debido a la lixiviación, tenga mayor trascendencia (Prunthy y Greenland, 1997; Peralta y Stockle, 2000; Ramos *et al.*, 2002). El nitrógeno aplicado en forma de nitrato asegura una mayor disponibilidad para las plantas aunque su elevada solubilidad hace que sea altamente vulnerable al arrastre del agua que circula a través del suelo (Meyer y Marcum, 1998). El uso de fertilizantes en forma de urea o amoniacales reduce en un primer momento el riesgo de ser arrastrados por el agua percolante, hasta que pasan a formas oxidadas (nitratos) debida a la acción de los microorganismos del suelo (Nitrosomonas y Nitrobacter). La aportación de materia orgánica, disminuye los riesgos de pérdida de nitratos, ya que el nitrógeno se libera de forma progresiva además de contribuir en otras propiedades del suelo. Sin embargo, en cultivos exigentes en nitrógeno como el maíz, difícilmente puede satisfacer la demanda, siendo necesaria la complementariedad con la fertilización mineral si se pretenden obtener producciones máximas.

La solución a las pérdidas de nitratos radica en el aporte de menores cantidades de fertilizante mineral con mayor frecuencia o bien en el empleo de abonos de liberación lenta. Estos abonos van aportando el nitrógeno progresivamente, de forma que si no se eliminan totalmente las pérdidas, éstas se reducen en gran medida. Los fertilizantes de liberación lenta pueden clasificarse en tres grupos:

Abonos recubiertos: son fertilizantes convencionales que se presentan en forma de gránulos envueltos en una membrana semipermeable, que está constituida por una sustancia insoluble o de baja solubilidad en agua. La disolución del fertilizante se produce de manera lenta, conforme el agua va atravesando el recubrimiento.

La urea-azufre (URA), es el abono recubierto de uso más extendido. La cantidad de azufre oscila entre el 15 y el 19% del peso total del producto según la eficacia del recubrimiento que se desee, para ajustarlo a las necesidades del cultivo. No obstante, no resulta eficiente en cultivos que requieren grandes cantidades de nitrógeno en un periodo relativamente corto (maíz, trigo, etc.)

Abonos de baja solubilidad: son abonos que requieren gran cantidad de agua para su completa solubilidad, asegurando una baja concentración de nitrógeno en la disolución nutritiva. Pueden utilizarse productos orgánicos e inorgánicos. Entre los primeros destacan: urea-formaldehído, isobutilendiurea (IBDU), crotolidediurea (CDU), oxamida, etc. Los productos inorgánicos son fosfatos dobles de amonio y un metal.

Abonos con inhibidores de la nitrificación: las principales pérdidas de nitrógeno cuando se aplican fertilizantes amoniacales y urea, se producen después de su conversión a nitratos. Existen ciertos materiales que son tóxicos para las bacterias nitrificantes y cuando se añaden al suelo, pueden inhibir temporalmente la nitrificación. Por tanto, reducen las pérdidas de nitratos por lixiviación y nitrificación y se aumenta el rendimiento de los fertilizantes amoniacales, así como del nitrógeno amoniacal que se origina a partir de la descomposición de la

materia orgánica del suelo. La inhibición no debe ser total y estos productos deben ser selectivos, de forma que sólo actúen sobre los microorganismos nitrificantes y no sobre otros microorganismos. Se aplican principalmente en cereales (trigo, maíz y algodón). Su persistencia en el suelo es de 2-3 meses y se eliminan por volatilización y degradación a otros compuestos.

2.4.2 Riego y lixiviación de nitratos

El transporte de nitratos a través del perfil del suelo se encuentra influenciado no solo por las propiedades del mismo y dosis de fertilización, sino también por el tipo de cultivo y la aplicación de riego. En suelos con contenidos importantes de arenas finas o limos, se evidencian las mayores pérdidas de nitrógeno bajo riego. La presencia de suelos con textura como las mencionadas anteriormente y sin horizontes que limiten el movimiento del agua del suelo, generarían condiciones favorables para la migración de nitratos en profundidad (Rimski-Korsakov, H; M.Torres Duggan; R.S.lavado, 2002). Está demostrado que la cantidad de nitrato aumenta de manera importante con el caudal del agua de riego para un mismo aporte de fertilizante nitrogenado. El regadío puede facilitar la contaminación nítrica del agua mediante el movimiento de las aguas aportadas, tanto en sentido vertical desde la superficie a los estratos más profundos (lixiviación), como por escorrentía superficial (lavado).

Los riesgos de contaminación en los regadíos varían según las características del suelo (permeabilidad, capacidad de campo, profundidad, pendiente, nivel de la capa freática, etc.), las prácticas agronómicas (modalidad del abonado, rotación de cultivos, laboreo del suelo, etc.), el método de riego y su utilización.

Las zonas de regadío presentan diferentes niveles de riesgo en función de una serie de características.

Las **zonas de alto riesgo** de contaminación son aquellas que presentan: estructura arenosa muy permeable y de limitada capacidad de campo, capa freática superficial no superior a 2 metros de terreno superficial apoyado sobre una roca fisurada, pendiente que supere el 2-3%, práctica de una agricultura intensiva con aportes elevados de abonos, ricos en materia orgánica y labrados con frecuencia etc.

Las **zonas de riesgo moderado** presentan: suelos de composición granulométrica media, baja permeabilidad, discreta capacidad de campo y una presencia de nivel freático de 2 a 15 metros; así mismo tener una profundidad media no inferior a 50-60 cm, una pendiente moderada, aportes moderados de fertilizantes, etc.

Por último, las **zonas de bajo riesgo** son aquellas de suelos tendiendo a arcillosos, poco permeables y con elevada capacidad de campo, profundos de más de 60-70 cm, con capa freática a más de 20 metros y escasa pendiente.

En riego por aspersión, se han realizado por diversos autores trabajos de investigación rigurosos, que han llevado a la conclusión de que es imposible

reducir totalmente la percolación de nitratos si se desea seguir manteniendo los niveles productivos actuales; sin embargo es posible reducir la pérdida a niveles mínimos ($< 20 \text{ UF de N ha}^{-1}$), actuando sobre cuatro factores que están bajo el control del regante. Estos factores: a) cantidad de agua aplicada; b) fuente de nitrógeno; c) cantidad de nitrógeno aplicado; d) época de aplicación de dicho nitrógeno. Sería importante prestar particular atención a la distribución de los aspersores sobre la parcela, a la intensidad de la pluviometría respecto a la permeabilidad del suelo, a la interferencia del viento sobre el diagrama de distribución de los aspersores y a la influencia de la vegetación sobre el reparto del agua sobre el terreno.

En riego por inundación, para evitar la pérdida de nitrato en profundidad, debe ser adoptado en terrenos profundos, de textura media a fuerte y para cultivos dotados de sistema radicular profundo.

2.4.3 Medida de la lixiviación de nitratos

Aunque la lixiviación de nitrato tiene una gran importancia medioambiental, su medida no es fácil y en los pocos casos en que se han comparado diferentes métodos de medida, los resultados han sido contradictorios (Kleeberg, 1995; Kieke and Kleeberg, 1997). Básicamente la lixiviación de nitrato se puede medir conociendo para cada periodo corto de tiempo el flujo de solución del suelo a través de un determinado plano, y su concentración media de nitrato. Existen varios métodos para medir cada una de las dos variables mencionada. Para la medida del drenaje existen métodos directos que no se utilizan y métodos indirectos que son más frecuentes.

2.4.3.1 Métodos basados en medidas de gradiente hidráulico conductividad hidráulica

Estos métodos calculan el flujo de agua entre dos puntos del suelo mediante el producto del gradiente de potencial hidráulico por la conductividad media del suelo (K).

2.4.3.2 Métodos basados en el balance de agua:

En estos métodos el drenaje D, se calcula en función de los otros términos del balance de agua de una capa de suelo, durante un periodo de tiempo determinado:

$$D = \text{Lluvia} + \text{Riego} - \text{Evapotranspiración} - \Delta H - \text{Escorrentía}$$

Donde ΔH es el incremento de agua del suelo. En esta ecuación se supone que no hay flujos laterales de agua excepto la escorrentía superficial. La

exactitud de la estimación del drenaje, depende de aquella con la que se determinan los otros términos del balance. La importancia de estos varía con las diferentes situaciones, por ejemplo, para periodos largos (1-2 meses) en época de riego, el término ΔH es pequeño en comparación a los otros. En una parcela en barbecho, durante la época de lluvias, la principal fuente de incertidumbre puede ser la falta de buenas medidas de escurritía, sobre todo si el suelo tiene cierta pendiente y estaba húmedo en el momento de la lluvia.

La exactitud en la determinación de la ETP es muy importante para tener buenas estimaciones del drenaje. Así pues, la medida de la ET constituye uno de los principales retos para la estimación del drenaje por balance de agua. Métodos para medida o estimación de la escurritía han sido descritos por Schwab *et al.* (1996).

Debido a las dificultades que presenta la medición directa de la ETP, ésta se calcula más a menudo a partir de datos climáticos. En la estimación de la ETP, conviene considerar dos casos: a) la ETP no está limitada por un déficit de agua en el suelo u otro factor y b) la ETP está limitada por la falta de agua o nutrientes o algún factor no climático que afecta el crecimiento normal de las plantas (enfermedades o plagas).

En el primer caso, hay dos métodos que calculan la ET del cultivo a partir de la ETP máxima de un cultivo de referencia (normalmente una cubierta vegetal de césped bien regado) (ET_0), mediante la expresión: $K_c * ET_0$, donde K_c es un coeficiente que depende del cultivo y de la fase de desarrollo en la que se encuentra.

Halfield y Allen (1996), evaluaron las fórmulas de Penman-Monteith y Priestley-Taylor para calcular la ET_0 y concluyeron que en climas semiáridos la fórmula de Penman-Monteith dio buenos resultados, mientras que en climas húmedos la fórmula de Priestley-Taylor fue mejor.

2.4.3.3 Balance de cloruro.

Se ha empleado para estimar el drenaje (Slavich y Yang, 1990; Walker *et al.*, 1991; Lidon *et al.*, 1994; Al-Jamal *et al.*, 1997; Snovo *et al.*, 1999), la lixiviación de nitrato (Pratt *et al.*, 1978; Dasberg *et al.*, 1984; Ramos, 1988) y la recarga de acuíferos (Allison *et al.*, 1994; Claasen *et al.*, 1996).

2.4.3.4 Métodos de muestreo de la solución drenante

Existen varios métodos entre los cuales se pueden distinguir:

Lisímetros: permiten obtener muestras de la solución que drena y además el volumen de drenaje. Sin embargo el método presenta algunos inconvenientes:

- Los lisímetros en los que se pueden recoger los lixiviados suelen ser caros (Goulding y Webster, 1992).

- Las condiciones del suelo en el lisímetro, rara vez son representativas de las condiciones del suelo en la parcela experimental en la que se quiere obtener las medidas.
- Pueden presentar problemas de poca profundidad para el desarrollo de las raíces.
- En suelos en los que se forman grietas con facilidad, puede haber problemas de flujo preferencial en la zona de contacto del suelo con las paredes del lisímetro (Poss et al., 1995)
- El crecimiento de las plantas en los lisímetros puede ser diferente del que ocurra fuera del mismo, y con ello la ETP puede ser también diferente.

Muestreo del suelo: evalúan la lixiviación de nitrato a partir de la variación del nitrato presente en el suelo entre dos fechas. El método no tiene en cuenta las variaciones en el contenido de nitrato del suelo atribuible a la mineralización, desnitrificación y otros términos del ciclo del nitrógeno.

En otros casos, se muestrea el suelo para determinar la concentración de NO_3^- de la solución del suelo y esa concentración se multiplica por el drenaje estimado por cualquiera de los métodos que ha sido descritos anteriormente (Kücke y Kleeberg 1997).

Cápsulas porosas de succión: Las cápsulas se emplean con frecuencia para la extracción de la solución del suelo en condiciones de campo. Son relativamente baratas, se pueden instalar fácilmente y permiten el muestro de solución del suelo con cierta frecuencia (Goulding y Webster, 1992). Se recomienda que la succión que se aplica a los tubos que llevan las cápsulas sea sólo ligeramente superior a la tensión del agua en la zona del suelo donde se muestrea (Barbee y Brown, 1986).

El volumen de suelo muestreado no es muy grande y depende en parte, de la humedad del suelo. Normalmente los muestreadores de cápsulas cerámicas constan de un tubo de PVC, en el que en un extremo se pega una cerámica porosa y en el otro extremo, que es el que sobresale del suelo, lleva un tapón que permite la aplicación de una determinada succión que se mantiene constante durante varios días. Estos muestreadores se instalan en un agujero que se hace en el suelo con un diámetro superior al del tubo que lleva la cápsula cerámica, introduciéndolos hasta que la cápsula llega al fondo de dicho agujero. Para facilitar el contacto hidráulico de la cápsula con el suelo de alrededor, se suele preparar inmediatamente antes de introducir el muestreador en el agujero una pasta hecha con el mismo suelo.

Beckman *et al.* (1992), estudiaron el contacto de las cápsulas con el suelo y encontraron una evidencia visual de compactación y grietas en el suelo alrededor de las cápsulas. Las grietas que se pueden formar en suelos arcillosos pueden aumentar a medida que el suelo se seca y reducir sustancialmente la superficie de contacto de la cápsula con el suelo y como consecuencia reducir la facilidad de extracción de la solución del suelo. También es posible que se produzca flujo preferencial en la zona de contacto del tubo con el suelo; la importancia de este flujo en la representatividad de la muestra es variable.

2.5 FERTILIZACION NITROGENADA

Las necesidades nutritivas de los cultivos son función de los rendimientos que éstos pueden alcanzar. Si el agroecosistema tiene un potencial de rendimiento elevado, las necesidades de nutrientes por parte del cultivo serán consecuentemente más elevadas y viceversa (Rodríguez, 1993). Lo importante en nutrición de cultivos es que ninguno de los elementos esenciales para el crecimiento de las plantas sea o vaya a convertirse en un factor limitativo para que alcancen los rendimientos máximos posibles en un ambiente dado. Ello exige conocer cuál es el rendimiento máximo posible (Galvis *et al.*, 1993).

Desde un punto de vista agronómico, la demanda de nutrientes de un cultivo aumentará a medida que aumentan el rendimiento y la producción de biomasa asociada con este. El primer paso en el diseño de un plan de fertilización de un cultivo debe ser definir los rendimientos máximos posibles. El segundo aspecto a tener en cuenta es qué proporción de dicha demanda puede ser cubierta por el suelo, es decir, el suministro de nutrientes en las condiciones en que se encuentra el suelo.

Es conocido que la demanda de muchos elementos esenciales, puede ser satisfecha por la fertilidad intrínseca del suelo, particularmente cuando los rendimientos esperados son bajos, así como que el abastecimiento que hace el suelo de varios elementos esenciales, particularmente de los macronutrientes primarios, no es suficiente para satisfacer la demanda de los cultivos. Entre los elementos que con mayor frecuencia se encuentra en déficit en los suelos están: el nitrógeno, el fósforo, el potasio y con menor frecuencia el boro y el magnesio.

Gran parte del esfuerzo en el área de nutrición de cultivos en el pasado, ha sido dedicado a evaluar la capacidad de abastecimiento de nutrientes que poseen los suelos y los requerimientos o necesidades nutritivas de los cultivos (Wasterman, 1990). En la actualidad además es común hacer un seguimiento del estado nutricional de los cultivos a lo largo del ciclo de crecimiento, para evitar que la nutrición pudiese ser un factor limitativo para la producción (Reuter y Robinson, 1986). Si se observa una deficiencia de nutrientes, es necesario balancear el abastecimiento mediante la aplicación de fertilizantes. Se sabe que las aplicaciones de fertilizantes no son cien por cien efectivas, la planta sólo puede utilizar una parte de lo aplicado; de aquí que exista la necesidad de conocer la eficiencia de uso de los diferentes fertilizantes en los diferentes cultivos. Esta eficiencia depende de la naturaleza de los fertilizantes, del tipo de cultivo, del suelo y de la tecnología de aplicación. En resumen, se puede decir que el plan de manejo nutritivo de un cultivo depende de la demanda de nutrientes del cultivo, del suministro que pueda hacer el suelo y de la eficiencia de uso del fertilizante. Todo lo cual se expresa en un modelo simplificado (Rodríguez, 1993), que dice:

$$\text{Dosis de fertilizante} = \frac{\text{Demanda del cultivo} - \text{Suministro del suelo}}{\text{Eficiencia de recuperación del fertilizante}}$$

Así, si la demanda del cultivo es menor o igual al suministro, la dosis de fertilizante a aplicar sería 0, aunque es aconsejable aplicar una fertilización de mantenimiento equivalente a la exportación de nutrientes por el producto de la cosecha más una pequeña cantidad. Si la demanda es mayor que el suministro por el suelo, será necesario fertilizar. La dosis será proporcional a la magnitud del déficit encontrado.

Un cultivo puede alcanzar un rendimiento cercano al máximo que se le permite, cuando los niveles de todos los factores de crecimiento necesarios para su crecimiento y desarrollo son ideales. Los rendimientos máximos posibles que son de real interés son aquellos económicamente viables, más que los fisiológicos, pero primero hay que definir estos últimos. Lo anterior implica algunas ideas a tener en cuenta:

1. Existe un rendimiento máximo que los cultivos podrían alcanzar, pero es un nivel teórico.
2. En la práctica es imposible alcanzar dichos rendimientos, porque no se pueden contar con niveles ideales de todos y cada uno de los factores de crecimiento. Algunos, los menos, pueden ser controlados por el hombre, pero la intensidad de los no controlables depende de cada sistema ecológico en particular.
3. Si se optimizasen todos aquellos factores que el hombre puede controlar, todavía se tendrían factores (factores no controlables) que dependen del ecosistema. La intensidad de estos factores sería la que determinaría el rendimiento que un cultivo puede alcanzar bajo una condición dada, partiendo de la base de que todos los factores controlables fueron llevados a un óptimo.
4. Un mismo cultivo puede alcanzar distintos rendimientos dependiendo del lugar donde se siembre y se podrán obtener rendimientos cercanos a los máximos para esas condiciones si todos los factores controlables son óptimos.

¿Cómo se pueden establecer estos rendimientos cercanos a los máximos?

Los rendimientos máximos alcanzables en una zona cualquiera se pueden establecer a partir de una encuesta que se realiza entre los mejores agricultores de la zona. Se debe obtener información acerca de los rendimientos máximos que logran y la frecuencia con que éstos son alcanzados. También pueden estimarse con base en los rendimientos máximos alcanzados en redes de ensayos experimentales realizados en la zona. Los experimentos son conducidos de manera tal, que el rendimiento obtenido por el mejor tratamiento es cercano al máximo posible.

Conocido el rendimiento es posible calcular la biomasa asociada con dicho rendimiento y con ello la demanda de nutrientes. Esta demanda se puede estimar una vez que se conozca la biomasa de la parte aérea y el requerimiento nutricional interno de un cultivo (Rodríguez, 1993):

$$\text{Demanda} = \text{Biomasa} \times \text{requerimiento interno}$$

La biomasa se relaciona de una manera bastante definida con los rendimientos de la parte útil mediante la siguiente expresión:

$$\text{Biomasa} = \text{Rendimiento} / \text{Índice de cosecha}$$

donde

$$\text{Índice de cosecha} = \text{rendimiento} / \text{biomasa.}$$

El proceso de la fertilización podríamos dividirla en varias etapas:

1. Muestreo y análisis de suelo: el análisis de suelos es una práctica básica para determinar la fertilidad actual y potencial. El objetivo es efectuar un balance y posteriormente establecer las cantidades de fertilizantes a agregar. Es importante efectuar el muestreo, procurando tomar muestras en zonas representativas y homogéneas, evitando mezclar muestras de suelo de zonas diferentes. La intensidad de muestreo dependerá del nutriente a evaluar.

2. Diagnóstico de la fertilización: se efectúa analizando los resultados provenientes del análisis de suelo y el clima local. Es importante disponer de información histórica y de ensayos realizados en el propio campo o eventualmente en la zona. También es importante definir los objetivos de producción para la campaña que estamos planificando y la estrategia definida deberá tener coherencia con la meta de producción. Esto es muy importante para el manejo del nitrógeno, ya que la dosis de este nutriente es directamente dependiente del rendimiento esperado.

3. Diseño del plan de fertilización: una vez realizado el diagnóstico (en el cual se debería establecer la necesidad o no de fertilizar y en el caso de hacerlo, las cantidades de nutrientes a aplicar), es necesario llevar a cabo un plan de fertilización.

Consiste en la definición de las cantidades y tipos de fertilizante a aplicar, así como del momento y tecnología de aplicación para satisfacer las necesidades del cultivo.

4. Ejecución y seguimiento del plan de fertilización: es la implementación efectiva en la práctica del plan definido. Sin embargo, a medida que se va ejecutando el plan pueden surgir cuestiones no previstas que requieren de un ajuste, por ejemplo, lluvias menores a las previstas o cambios de precios de grano que inciden en las dosis aplicadas.

5. Evaluación y análisis de los resultados del plan de fertilización: consiste en analizar y evaluar si la estrategia de fertilización utilizada funciona y con qué grado de eficiencia.

2.5.1 Fertilización nitrogenada en maíz

La respuesta productiva del maíz (*Zea Mays*.L) a distintas aplicaciones de fertilizante nitrogenado se ha estimado en múltiples ocasiones, casi siempre para localidades y condiciones ambientales específicas.

El objetivo más generalizado para el cultivo de maíz es el de lograr buen crecimiento y altos rendimientos, para lo cual, a igualdad de otros factores de crecimiento, es necesario un adecuado y balanceado suministro de nutrientes.

Cubiertos los requerimientos de fósforo, el nitrógeno es el nutriente más importante para la producción del cultivo de maíz debido a las elevadas cantidades requeridas y a la frecuencia con que puede limitar los rendimientos. El aporte de nitrógeno al suelo mediante el abonado, tiene que ser suficiente para no limitar la producción y al mismo tiempo no ser excesivo para no aumentar las posibilidades de contaminación de las aguas subterráneas por nitratos. Debe estar bien provisto en cantidad para asegurar un óptimo estado fisiológico, en floración, por ser el momento alrededor del cual, se define un número de granos por unidad de superficie y en parte el rendimiento del cultivo.

La deficiencia de nitrógeno afecta la expansión foliar reduciéndola (Fernández *et al.*, 1996; Van Delden, 2001), la fotosíntesis (Ciompi *et al.*, 1996; Lu *et al.*, 2001), la síntesis y acumulación de materia seca, así como el rendimiento del cultivo (Dev and Bhardwaj, 1995). Paralelamente, la deficiencia de nitrógeno afecta a la cantidad de ramificaciones de las raíces, limitando la captación de otros nutrientes. Por otro lado, el exceso de nitrógeno provoca una baja eficiencia de uso del nutriente, encareciendo los costos de producción y poniendo en peligro la calidad del ambiente. El exceso de abono puede llegar a ser tóxica para el cultivo u ocasionar desequilibrios entre algunos nutrientes.

Dosis: generalmente la respuesta de los cultivos al abonado nitrogenado es alta cuando las dosis son bajas. A medida que la dosis crece, el aumento de la producción por unidad de fertilizante adicional disminuye, hasta llegar a un valor (dosis crítica), a partir del cual los incrementos de abonado ya no aumentan la producción. Sin embargo cuando la cantidad de nitrógeno fertilizante aplicado excede a las dosis críticas, la lixiviación de nitrato aumenta rápidamente.

Así pues la dosis de abonado nitrogenado debería ser próxima a esta dosis crítica, la cual depende del cultivo, del nitrógeno mineral presente en el suelo

antes del abonado, del contenido en materia orgánica de los suelos y otros factores. Tres aspectos a considerar en el efecto del abonado nitrogenado son: las dosis de abonado, la forma química y la época de aplicación. Se admite generalmente que el maíz necesita del orden de 25 a 30 kg N ha⁻¹ t⁻¹ de cosecha de grano esperado con un contenido en humedad del 14 %. Según esto, para una cosecha de grano de 10.000 kg ha⁻¹ al 14%, se estima que la planta extrae del suelo de 250 a 300 kg N ha⁻¹.

Forma química: las principales formas químicas del nitrógeno en el suelo son la orgánica y la mineral. Los estiércoles aportan el nitrógeno fundamentalmente en forma orgánica, mientras que los fertilizantes aportan el nitrógeno en forma mineral. La principal diferencia desde el punto de vista de las plantas es su disponibilidad, ya que las plantas sólo absorben de manera apreciable el nitrógeno mineral (nitrato y amonio). El nitrógeno orgánico no se absorbe apenas por las plantas y necesita convertirse en nitrato y amonio previamente, mediante el proceso llamado mineralización. La forma química del nitrógeno más fácilmente asimilable por las plantas es el nitrato, seguida por el amonio, la urea y las formas orgánicas.

Entre los abonos nitrogenados que se pueden utilizar en el cultivo de maíz, cabe destacar los que seguidamente se citan y que se pueden agrupar en: a) abonos nítricos; b) abonos amoniacales; c) abonos amónico-nítricos y d) abonos mixtos. Los abonos amoniacales son los que contienen nitrógeno en forma amoniacal, o muy próximo a ella (amídica). Al incorporarlos al suelo, el ión amonio (NH₄⁺) se fija en el complejo arcillo-húmico pasando gradualmente a la forma nítrica (NO₃⁻) a velocidad variable según las condiciones, viéndose favorecido el fenómeno con temperaturas suaves a elevadas, buena aireación y suficiente humedad. Entre ellos podemos citar la urea.

La urea se caracteriza por tener una riqueza en nitrógeno del orden del 46% todo en forma amídica; muy soluble en agua puede ser arrastrada por el agua de lluvia o riego; por este arrastre no genera pérdidas sino que por el contrario permite una distribución del abono en profundidad muy conveniente.

Los abonos amónico-nítricos, son aquellos que contienen el nitrógeno en ambas formas, nítrica y amoniacal. Sus posibilidades de actuación son muy amplias, siendo en general los abonos nitrogenados más utilizados. Es muy soluble en agua y muy higroscópico. Una vez incorporado al suelo, la humedad de éste y la del ambiente (rocío, lluvia, etc.) actúan rápidamente solubilizando el abono. Aunque el maíz absorbe la mayor parte del nitrógeno en forma de nitrato, está demostrado que en los primeros estados de crecimiento las jóvenes plantas pueden tomar de la solución del suelo nitrógeno en forma amoniacal.

Momento de aplicación: tanto el momento de aplicación como la forma química del abonado nitrogenado son importantes porque ambos factores influyen en la cantidad de nitrógeno disponible en el suelo cerca de las raíces en un momento determinado. La tasa de absorción de nitrógeno es baja en los estados iniciales de desarrollo hasta V5-V6 estado de 5-6 hojas (Richie, 1993). Por esta razón se

suele aportar una fracción de las necesidades totales en un primer abonado de fondo previa a la siembra o trasplante y el resto, en una o dos aplicaciones más (al inicio de la fase de crecimiento rápido y en la mitad aproximadamente de esta fase).

El maíz comienza su mayor consumo de nitrógeno alrededor de seis hojas completamente extendidas (V6 a V7), por lo que antes de comenzada esta etapa fenológica, el cultivo debería de disponer de una oferta de nitrógeno adecuado para satisfacer su demanda para crecimiento. Las estrategias de fertilización podrían resumirse en tres posibilidades, a) fertilizar únicamente a la siembra o incluso antes; b) fertilizar sólo con el cultivo implantado entre dos y siete hojas (V2 a V6) y c) fraccionar la dosis entre la siembra y V7 en dos aplicaciones. De las tres alternativas, serían más recomendables las aplicaciones fraccionadas, donde se garantiza una gran parte de la necesidad total de nitrógeno a la siembra (70 a 80%) regulando luego la cantidad de nitrógeno restante en función de la evolución de la campaña y de las posibilidades ofrecidas por las condiciones climáticas.

Otros factores que influyen en la eficiencia de utilización del nitrógeno por los cultivos son la textura y profundidad del suelo, la profundidad del sistema radicular de la planta y la eficiencia de riego. Parece comprobado que la presencia de una excesiva concentración de nitrógeno nítrico en el suelo en el momento en que se está formando el sistema radicular de las plantas de maíz perjudica el desarrollo de las raíces jóvenes. Por ello, no es recomendable localizar demasiado nitrógeno en la proximidad de las semillas y menos aún en forma de nitrato.

La absorción de nitrógeno por la planta de maíz se realiza de forma muy variable según las diferentes fases del desarrollo en la que se encuentre. En los primeros momentos, tras la germinación, la absorción de nitrógeno es muy lenta y relativamente escasa. A partir de la nascencia y hasta un mes aproximadamente antes de la floración, el consumo de nitrógeno no es muy importante (15% del total) y se hace de forma gradual. A partir de este momento y hasta la floración (alargamiento de las sedas) el consumo de nitrógeno crece de manera importante y en poco más de un mes, se consume del orden del 45% del nitrógeno total que necesita la planta. El 35% restante se consume de forma gradual hasta que se completa la madurez del grano. En esta última fase existe una importante emigración de nitrógeno hacia la mazorca y el grano, alcanzándose en ellos la máxima concentración de nitrógeno. Se estima que el maíz utiliza el 75% aproximadamente del total del nitrógeno absorbido desde el suelo en la formación de sus órganos reproductores. Si en el periodo comprendido entre una a tres semanas antes de la aparición de los estilos y una a dos semanas después de dicho periodo la planta sufre carencia de nitrógeno, la producción de grano se verá perjudicada de forma grave e irreversible.

2.5.2 Fertilización nitrogenada del maíz en Navarra

Desde 1980 el Instituto técnico y de Gestión Agrícola, empresa pública adscrita al Departamento de Agricultura, Ganadería y Alimentación del Gobierno de Navarra, viene desarrollando en la comunidad foral de Navarra un Plan de Racionalización de la Fertilización, cuyo objeto final es el transmitir a los agricultores recomendaciones de fertilización que supongan la optimización económica de la utilización del nitrógeno como medio de producción, así como la integración en este concepto de los criterios de producción medioambiental.

El objetivo final es que recurriendo a la fertilización nitrogenada como herramienta de productividad y rentabilidad se limiten al máximo las pérdidas de dicho nutriente sobre todo vía lixiviación y escorrentía, susceptibles ambas de provocar contaminación de las aguas superficiales y subterráneas.

El Plan de Fertilización ha generado hasta la fecha más de 2.200 ensayos en los diversos cultivos, sobre todo en los extensivos, y está basado en un plan de experimentación a corto y medio plazo, que ha permitido alcanzar un grado fiabilidad notable.

El Plan de Experimentación desarrollado aborda el estudio exhaustivo de los tres macronutrientes principales (N, P y K), además de otros aspectos. Para llegar a confeccionar las recomendaciones con suficiente nivel de precisión se planteó una amplia red experimental donde se contemplaban y servían de elementos diferenciadores los siguientes factores: cultivo, área climática, subárea, tipo de suelo y cultivo precedente. Para cada situación se analiza la dosis de nutriente y en el caso del nitrógeno, la forma y época de reparto (fraccionamiento). Además en el caso del nitrógeno, se han analizado el comportamiento de las diferentes formas de nitrógeno en los parámetros de eficiencia según dosis aplicada. Cada año y en función de la cosecha habida, evolución de la climatología y estado fenológico del cultivo se modulan las cifras reflejadas como medias óptimas y se ajustan para acomodarlas a la situación real. Esta labor la puede llevar a cabo el agricultor por sí mismo o bien siguiendo las pautas que se establecen en las cooperativas mediante las labores de asesoramiento de los técnicos del ITG Agrícola.

Tradicionalmente el sistema de recomendaciones de fertilización nitrogenada del ITGA se basa en los resultados obtenidos de ensayos anuales realizados por los técnicos del ITG Agrícola en Navarra en parcelas de agricultor y con la colaboración de las cooperativas cerealistas. Los ensayos que se han venido realizando incluyen un tratamiento testigo sin fertilización nitrogenada y varias dosis de nitrógeno, distintos fraccionamientos y tipos de nitrógeno: urea, nitrato amónico. Con el análisis de producción de estos ensayos se obtiene una curva de respuesta productiva a la dosis de nitrógeno. De esta curva se obtienen la Dosis de Nitrógeno óptima Técnica y la óptima económica, siendo esta última la Dosis de fertilizante Recomendada (DR).

Estos estudios han servido de referencia para elaborar las recomendaciones de fertilización que vienen recibiendo los agricultores. Hasta ahora este método de recomendación de dosis de abonado nitrogenado, garantiza una buena aproximación para la obtención de un rendimiento óptimo de la

cosecha debido a que está respaldado por una gran cantidad de datos experimentales. El siguiente paso consiste en afrontar las limitaciones que el método tiene, al no incorporar las condiciones meteorológicas particulares de la campaña y el manejo del agua de riego, por una parte, ni la cantidad y disponibilidad real del nitrógeno aportado por el propio suelo de cultivo.

Así, la dosis recomendada en una parcela en concreto puede estar subestimada de forma que no se obtendría una producción óptima sobreestimada de forma que el exceso de fertilizante que no aprovecha el cultivo puede ser lixiviado a perfiles profundos del suelo, siendo potencialmente un riesgo de contaminación ambiental.

3. OBJETIVOS

OBJETIVOS

Los objetivos de este Trabajo Fin de Carrera son los siguientes:

- A. Determinar para la variedad de maíz *Dracma*, la respuesta productiva a diferentes dosis de nitrógeno.
- B. Determinar para la variedad de maíz *Dracma*, la dosis óptima de fertilizante nitrogenado.
- C. Determinar la influencia de diferentes sistemas de riego (aspersión e inundación), sobre la lixiviación de nitratos en el suelo.
- D. Establecer el balance de nitrógeno en el sistema suelo-planta.

4.MATERIALES Y METODOS

4.1 LOCALIZACIÓN DEL ENSAYO

El ensayo (Fe-04-052), fue realizado durante la campaña 2004-05 en la finca experimental del ITGA que se encuentra en Montes de Cierzo, en el término municipal de Tudela (Figura 2).

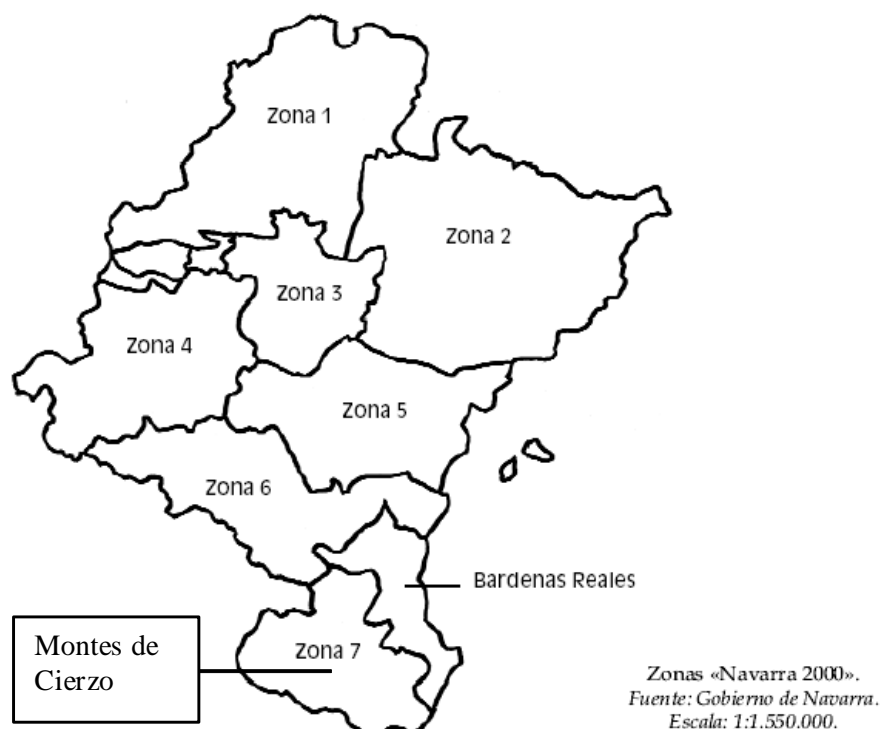


Fig 2. Localización del ensayo.

4.2 DISEÑO EXPERIMENTAL

La parcela en la que se lleva este ensayo tiene un precedente de maíz.

Los tratamientos que fueron objeto de estudio en este ensayo fueron los siguientes (Figura 3):

- riego por aspersión: 1, 2, 3, 4, 5.
- riego por inundación: 11, 12, 13.

Empleándose para:

- estudio de rendimiento del cultivo: 1, 2, 3, 4, 5.
- estudio de lixiviación de nitratos y balance de nitrógeno: 1, 4, 5, 11, 12, 13.

Split-Plot

Para el estudio de lixiviación de nitratos y balance de nitrógeno se empleó un diseño experimental en split-plot o parcela dividida (Figura 3). El factor principal o parcela principal fue el riego (inundación y aspersión) y la subparcela fue el nitrógeno (0, 240 y 320 kg N ha⁻¹).

La parcela experimental se dividió en cuatro bloques o repeticiones. Cada repetición fue dividida en dos parcelas principales donde se asignó el riego. Cada parcela principal se dividió en subparcelas donde se asignaron las dosis de nitrógeno.

Las dimensiones de las parcelas son de 6 metros de ancho por 10 metros de largo en riego por aspersión y 4 metros de ancho por 10 metros de largo en riego por inundación. Este tamaño es suficiente para que la superficie de cosecha no se vea afectada por los muestreos que se realizan a lo largo del experimento.

Bloques completos al azar

Para el estudio del rendimiento del cultivo en riego por aspersión se empleó un diseño de bloques completos al azar. La parcela principal se dividió en cuatro bloques. En cada bloque se asignaron de manera aleatoria los diferentes tratamientos (0, 80, 160, 240 y 320 kg N ha⁻¹). Las dimensiones de las parcelas son de 6 metros de ancho por 10 metros de largo.

---INUNDACIÓN---				----- ASPERSIÓN-----										
13	12	11		9	3	5	10	1	8	4	2	7	6	4 ^a Rep.
411	412	413		401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	
13	11	12		8	6	4	7	2	10	5	9	3	1	3 ^a Rep.
311	312	313		301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	
12	13	11		7	10	8	6	9	1	3	5	2	4	2 ^a Rep.
211	212	213		201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	
11	12	13		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1 ^a Rep.
111	112	113		101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	

Fig 3. Croquis del ensayo.

En la Tabla 4 se describen cada uno de los tratamientos, dosis de nitrógeno aportado y tipo de riego:

Tabla 4. Tratamientos, dosis de nitrógeno y tipos de riego.

Tratamiento	Riego	Dosis ⁽¹⁾ (kg N ha ⁻¹)
1	Aspersión	0+0
2	Aspersión	80+0
3	Aspersión	160+0
4	Aspersión	240+0
5	Aspersión	320+0
11	Inundación	0+0
12	Inundación	240+0
13	Inundación	320+0

(1) La primera cifra corresponde a la dosis de nitrógeno aplicada en primera cobertera y la segunda a la dosis aplicada en segunda cobertera.

Así mismo se colocaron 18 cápsulas cerámicas destinadas a recoger solución del suelo para posteriormente con dicha solución calcular la cantidad de nitrato en el suelo. También se colocaron 6 tubos de acceso FDR (Frecuency Domain Reflectometry), con los cuales se tomaron medidas de humedad con un sensor de capacitancia.

La distribución de dichas cápsulas y tubos de acceso se muestra en la Figura 4:

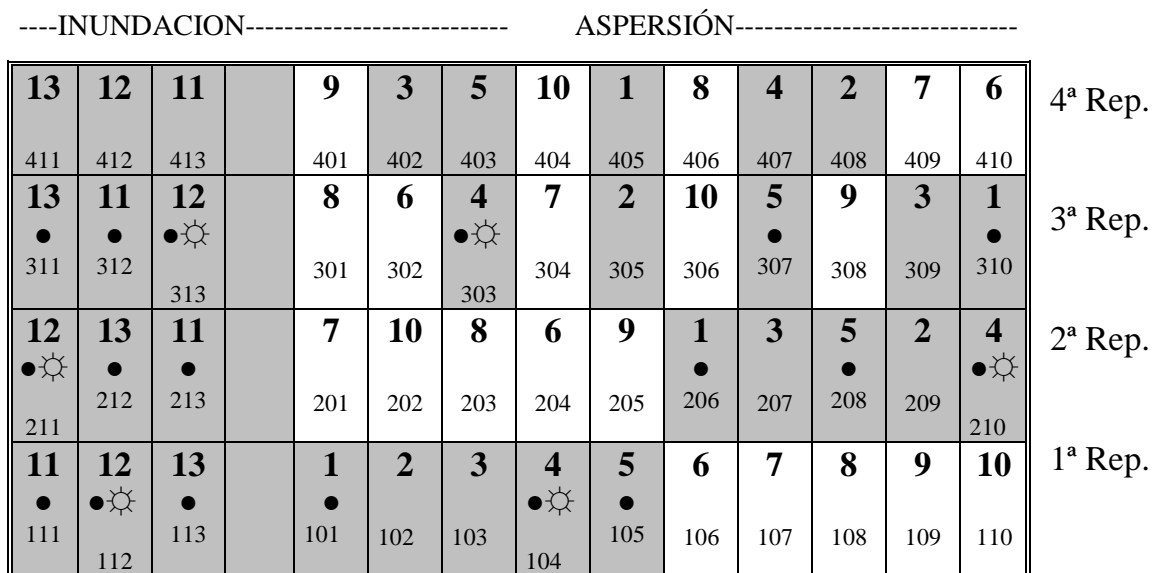


Fig 4. Distribución de las cápsulas cerámicas y tubos de acceso FDR.

- : Cápsulas cerámicas .
- ☀ : Tubos de acceso FDR.

4.3 MATERIAL VEGETAL

En este ensayo se ha utilizado, maíz que pertenece a la variedad “*Dracma*”. Esta variedad pertenece al ciclo 700 FAO. Se trata de un híbrido simple que se registró en España en el año 1988. Requiere un grado de humedad alto, una integral térmica a floración de 810 °C y a maduración de 1540 °C. Es de talla media, con precocidad de floración femenina media. Una característica importante excluida la producción, es su regularidad. Desde el punto de vista sanitario es muy sensible al ataque de taladro, pudiendo llegar a destruir plantas enteras si el ataque es fuerte, así como a las malas hierbas que interfieren por el agua, luz y nutrientes.

4.4 CLIMATOLOGÍA DE LA CAMPAÑA

Los datos de lluvias, temperatura, humedad relativa, radiación y velocidad del viento, han sido tomados por la estación meteorológica existente en la finca experimental, donde se lleva a cabo el ensayo. En las Figuras 5 y 6 se muestran las precipitaciones así como las temperaturas medias registradas a lo largo de la campaña 2004-2005.

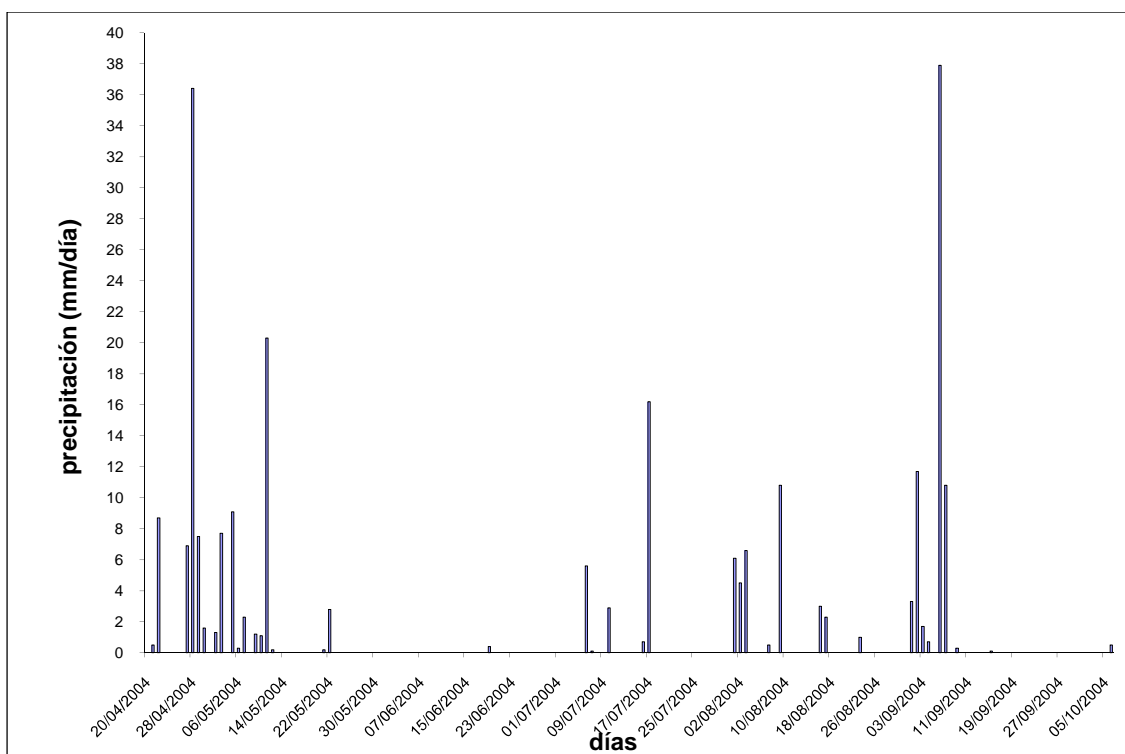


Fig 5. Precipitación media diaria. Campaña 2004-2005. Elaboración propia.

Estudiando los datos climáticos obtenidos durante la campaña y teniendo a su vez en cuenta las fases de desarrollo del cultivo y los periodos críticos, se puede observar que tanto las precipitaciones como las temperaturas fueron las adecuadas para la nascencia como para los primeros estadios de crecimiento. En las primeras etapas el maíz no requiere mucha humedad y con las lluvias que se registraron se cubrieron las necesidades de agua del cultivo.

A partir de mayo las temperaturas empiezan a aumentar coincidiendo con la fase de crecimiento, registrándose temperaturas medias comprendidas entre 16-26 °C, lo cual favorece el crecimiento de la planta. En la etapa en el que el cultivo tiene 8 hojas el crecimiento y desarrollo es muy rápido, siendo las temperaturas idóneas para esta fase aquellas en torno a los 24 °C, registrándose temperaturas comprendidas entre 18 y 28 °C. Así mismo es un periodo crítico en cuanto a humedad, las precipitaciones registradas fueron insuficientes para el óptimo desarrollo del cultivo con lo que se comenzaron a aplicar los riegos.

El periodo más importante es el comprendido entre las tres semanas antes de la floración y 8-12 días posterior a la misma. Se observa que las temperaturas en este periodo han estado comprendidas entre 15 y 30°C, temperaturas que se consideran óptimas para esta fase (lo que aseguró una correcta formación de los granos).

Llegada la fecundación las temperaturas registradas (26 °C tª media) influyeron positivamente en el llenado del grano.

La maduración y secado se ven favorecidos por temperaturas templadas y tiempo seco, (16°C-20°C).

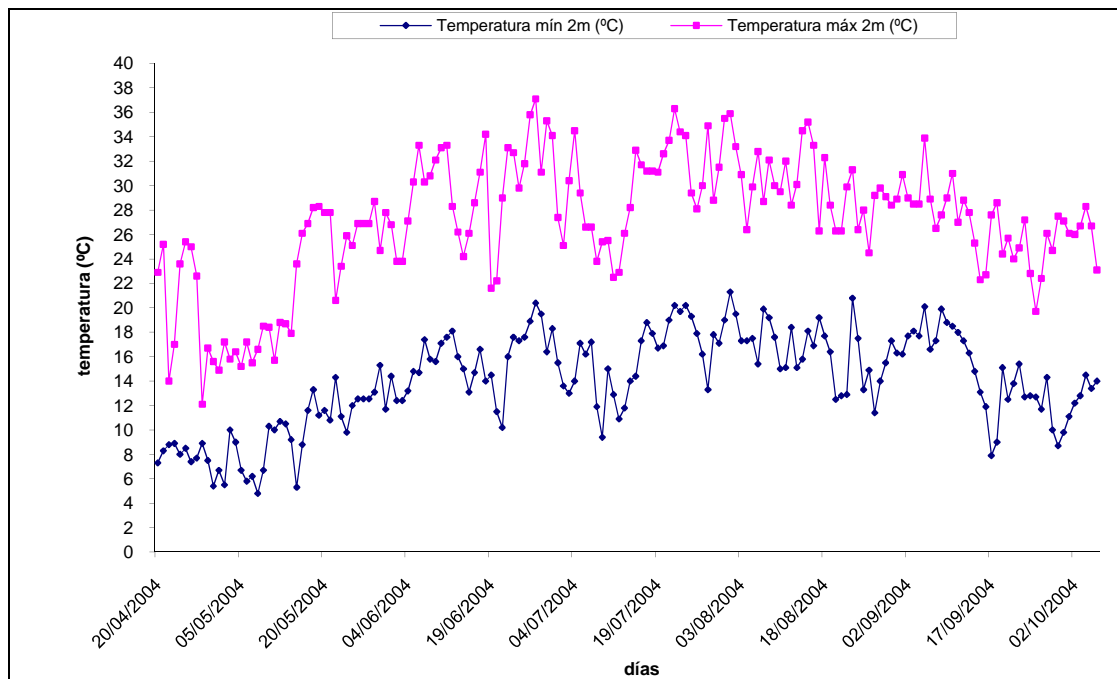


Fig 6. Evolución temperaturas. Campaña 2004-05. Elaboración propia.

4.5 SUELO

Las características del suelo van a ser muy importantes. El drenaje va a regular las condiciones de humedad y de aireación. Este drenaje viene determinado por la textura del suelo, la cual depende de las proporciones de partículas de distinto tamaño que lo constituyen: arena, limo y arcilla. La textura varía de unos horizontes a otros, es pues, una característica propia de cada uno de ellos, más que del suelo en su conjunto. Con los resultados obtenidos y teniendo en cuenta la clasificación de suelo U.S.D.A. se determina que es un suelo franco en todos los horizontes. Ver Anejo II.

El resultado del análisis de suelo a 0-30, 30-60, 60-90 y 90-120 cm de profundidad que fue efectuado el 10 de abril previo a la siembra, se expone en la Tabla 5:

Tabla 5. Características del suelo. Campaña 2004-2005

		Profundidad (cm)			
		0-30	30-60	60-90	90-120
Textura (U.S.D.A)	Arena %	50,62	49,34	46,23	45,22
	Limo %	31,87	33,43	35,28	35,57
	Arcilla %	17,51	17,23	18,49	19,21
		Franca	Franca	Franca	Franca
PH		8,26	8,26	8,26	8,26
Materia orgánica %		1,37	1,17	0,53	0,33
C/N		9,43	9,43	9,43	9,43
Fósforo (P ₂ O ₅) (mg kg ⁻¹)		28,37	27,23	22,14	22,72
Potasio (K ₂ O) (mg kg ⁻¹)		217,15	176,68	120,30	108,95

De acuerdo con los datos de la Tabla 5, se observa que en los primeros 30 cm de profundidad el suelo presenta un contenido en materia orgánica de 1,37% lo que clasifica el suelo como medianamente pobre. En los siguientes 60, 90 y 120 cm, los valores son de 1.17, 0,53 y 0,33%, lo que lo califica en un suelo pobre en materia orgánica a esa profundidad (Vázquez, 1997).

La importancia de la materia orgánica en el suelo está dada por su influencia en la estructura del suelo, suministro de elementos nutritivos, en la relación C/N y en el aporte de alimento para los microorganismos, es decir, influye en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Ortiz. B, 2008).

Respecto a los valores de fósforo y potasio, los valores normales están comprendidos entre 20 y 60 para el fósforo y 150-300 en el potasio. En este ensayo el valor de potasio osciló entre 217,15 mg kg⁻¹ como valor máximo y 108,95 15 mg kg⁻¹ como valor mínimo. El fósforo dio un valor máximo de

28,3715 mg kg⁻¹ y un mínimo de 22,72 mg kg⁻¹ lo cual supone que en principio el cultivo no va a tener problemas de deficiencia.

Presenta una buena porosidad que favorece la aireación y la circulación de agua; así mismo tiene una importante capacidad para retener nutrientes iónicos. No presenta problemas para labores de cultivo.

El valor de pH, así como el valor C/N, son muy estables y en el ensayo fueron de 8,26 y 9,43 respectivamente.

4.6 LABORES DE CULTIVO

4.6.1 Abonado de fondo

El 14 de abril se realiza un abonado de fondo compuesto por:

120 UF P₂O₅ en forma de fosfato al 45%.

180 UF K₂O en forma de cloruro de potasa al 60%.

0 UFN

4.6.2 Siembra

La siembra se realiza el 20 de abril. La separación entre líneas es de 70 cm y entre plantas de 30 cm. Se realiza con una sembradora de cereales de marca “Monosem”. La densidad de plantas final, fue de 70.000 plantas ha⁻¹.



Fig 7. Sembradora de cereales de precisión. Fuente (Navarra Agraria)

4.6.3 Abonado de cobertera

En la Tabla 6 vienen indicadas las dosis de abono aplicado.

Tabla 6. Dosis de nitrógeno del ensayo.

Tratamiento	UFN ha ⁻¹
1	0
2	80
3	120
4	240
5	320
11	0
12	240
13	320

El abonado de cobertera se lleva a cabo el 16 de junio, coincidiendo con el estado fenológico V6-V8, etapa crítica del cultivo, en el que el cultivo comienza su mayor consumo de nitrógeno, con esta aplicación se satisface su demanda para crecimiento.

El abono utilizado en 1^a cobertera fue urea en todos los tratamientos.

4.6.4 Tratamientos fitosanitarios

A lo largo del desarrollo del cultivo se llevó a cabo la aplicación de distintos herbicidas. Una aplicación se llevó a cabo en presembrado. La segunda aplicación se llevó a cabo el 10 de junio.

Los herbicidas utilizados fueron los siguientes:

ALACLORO

Materia activa: Alacloro 48%.

Formulación: concentrado emulsionable (EC).

Control de: GRAMÍNEAS: *Echinochloa crus galli*, *Digitaria sanguinalis*, *Setaria pumila*, *Setaria verticillata*. DICOTILEDÓNEAS: *Amaranthus retroflexus*, *Datura stramonium*. OTRAS ESPECIES: *Cyperus rotundus*, *Cyperus escolentus*.

Momento de aplicación: Presembrado. En este ensayo fue aplicado el 16/4/2004.

Acción: radicular.

ATRAZINA

Materia activa: Atrazina 50%.

Formulación: Suspensión concentrada (SC).

Control de: GRAMÍNEAS: *Ricis de cereal, Xantium strumarium* .

DICOTILEDÓNEAS: *Polygonum aviculare, Chenopodium album, Sinapsis Arvensis, Solanum nigrum, Amaranthus retroflexus, Portulaca oleracea, Salsola kali, Ricio de girasol, Polygonum convolvulus, Malva silvestris, Datura stramonium.*

Momento de aplicación: Presiembra. Aplicación en el ensayo: 16/4/2004.

Acción: foliar y radicular.

ELITE

Materia activa: Imazetapir + Pendimetalina: 2%+ 32%.

Formulación: Emulsión concentrada (EC).

Control de: GRAMÍNEAS: *Echinochloa crus-galli, Setaria pumila, Setaria verticillata.* DICOTILEDÓNEAS: *Xantium strumarium, Sinapsis arvensis, Amaranthus retroflexus, Portulaca oleracea, Datura stramonium.*

Momento de aplicación: Postemergencia.

Aplicación en el ensayo: 10/6/2004, en el momento en el que es cultivo se encontraba en el estadio de 6-8 hojas (V6-V8)

Acción: foliar y radicular.

EMBLEM

Materia activa: Bromoxinil 20%.

Formulación: Polvo mojable (WM).

Control de: DICOTILEDÓNEAS: *Xantium spinosum, Xantium strumarium, Cirsium arvense, Polygonum aviculare, Solanum nigrum, Amaranthus retroflexus, Portulaca oleracea, Abutilon theophrasti, Polygonum convolvulus, Datura stramonium.*

Momento de aplicación: Preemergencia y Postemergencia. Aplicación durante el ensayo: 10/6/2004 con el cultivo en estadio de 6-8 hojas (V6-V8).

Acción: foliar.

4.6.5 Riego

Se aplicaron dos sistemas de riego: aspersion e inundación. El riego por inundación fue simulado.

Los tratamientos de riego se establecieron aplicando las cantidades de riego necesarias para cubrir las necesidades del cultivo (R). El calendario de riego se basó en la ET del maíz (Etc) que se estimó a partir de la evapotranspiración de referencia (Eto) y los coeficientes de cultivo (Kc).

Los tratamientos en aspersión recibieron 48 riegos con un intervalo entre riegos de tres días.

Los tratamientos en inundación recibieron 16 riegos con un intervalo entre riegos de 8 días.

En el Anejo I se presentan las fechas y dosis de agua aplicadas.

4.6.6 Cosecha

La cosecha se llevó a cabo el 22 de noviembre por personal del I.T.G.A.

4.7. PLAN DE MUESTREO

4.7.1 Seguimiento fenológico

A lo largo del cultivo se hace un seguimiento fenológico del ciclo vegetativo de la planta de maíz, identificando las distintas fases de crecimiento. Se observó el cultivo una vez por semana, para determinar en qué fase vegetativa se encontraba y a su vez observar problemas fitosanitarios y síntomas de deficiencia. A continuación se muestran las fechas en las que el cultivo se encontraba en los diferentes estadios:

20/4/2004: se realiza la siembra.

13/5/2004: se produce la nascencia.

21/5/2004: el cultivo se encuentra en el estado de 2-3 hojas: V_2-V_3

16/6/2004: el cultivo se encuentra en el estado de 6-8 hojas: V_6-V_8

8/7/2004: el cultivo se halla en estado de 10-12 hojas: $V_{10}-V_{12}$

15/7/2004: el cultivo se halla en estado de 12-14 hojas: $V_{12}-V_{14}$

22/7/2004: comienza la aparición del penacho, floración: V_{14}

5/8/2004: se produce el oscurecimiento de las sedas: R_2

19/8/2004: se produce la formación de las mazorcas: R_3

23/9/2004: el cultivo alcanza la madurez fisiológica: R_6

22/11/2004: tiene lugar la recolección.

En el Anejo II se muestran los diferentes estadios de desarrollo del maíz.

4.7.2 Nitrógeno mineral del suelo

A lo largo de la campaña se realizaron tres muestreos del suelo, para obtener el contenido de nitrógeno mineral. Se determinaron cuatro repeticiones y las muestras de suelo fueron tomadas a profundidades de 30, 60 y 90 cm manualmente mediante una barrena. Se guardaron en terrinas de plástico, manteniéndolas a baja temperatura y llevándolas posteriormente al laboratorio. El método de análisis del suelo fue el Método Kjeldhal.

Los datos obtenidos se utilizaron en el estudio del balance de nitrógeno, así como en la determinación de la dosis óptima de fertilizante nitrogenado.

Los muestreos fueron los siguientes:

- Presiembra (10/4/2004): Repeticiones: 1^a; 2^a y 3^a. En cada una de ellas se tomaron 3 submuestras en las parcelas elementales 1, 2, 3, 4, 5, 11, 12 y 13.
- Estado V8 (14/6/2004): Repeticiones: 1^a; 2^a y 3^a. Al igual que en presiembra se tomaron 3 submuestras en las parcelas elementales 1, 2, 3, 4, 5, 11, 12 y 13.
- Postcosecha (15/12/2004): Repeticiones: 1^a; 2^a, 3^a y 4^a. Se tomaron 3 submuestras en las parcelas elementales 1, 2, 3, 4, 5 en las repeticiones 1, 2 y 3^a y tres submuestras en las parcelas elementales 11, 12 y 13 en las repeticiones 2, 3 y 4^a.

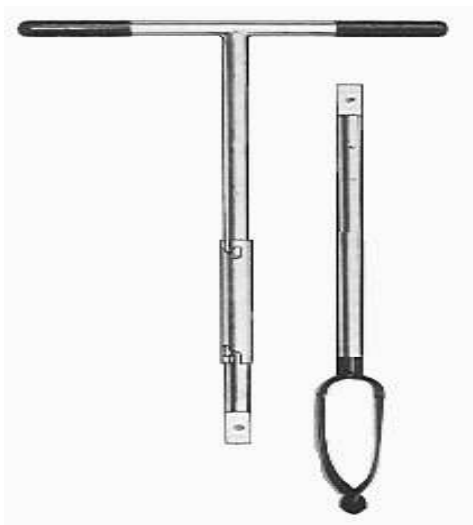


Fig8. Barrena para muestreo de suelo.

4.7.3 Muestreo de la solución del suelo

En el ensayo se instalaron 18 cápsulas cerámicas, recogiendo muestras de solución del suelo mediante succión cada 8 días. La primera recogida de muestras se efectuó el 13 de mayo de 2004.

La solución extraída se vertía en un matraz del cual se tomaba una muestra en un vial convenientemente etiquetado. Se transportaban el mismo día al laboratorio donde posteriormente se analizaban. En estas muestras se analizó el contenido de nitrato y sirvieron para calcular la lixiviación de nitratos a lo largo del ciclo del cultivo. El método utilizado fue el Método de colorimetría.

La instalación de los tubos es como sigue: se realiza un orificio de 1 mt de profundidad con una barrena cuyo diámetro es ligeramente superior al tubo; a continuación se llena el agujero con barro que se obtiene al mezclar tierra de la propia parcela con agua y se introduce el tubo. Ajustado el tubo se hace vacío hasta 0.4 bar con la bomba de vacío y se cierra el extremo de la goma que sobresale del tubo con una pinza. El tapón se sella con silicona.

4.7.4 Medición de la humedad del suelo

Para calcular la variación de la reserva (VR) se utilizó un sensor de capacitancia: DIVINER 2000 (Sentek Pty, 0Australia), (Figura 9). Su funcionamiento se basa en estimar la constante dieléctrica del suelo (k_a) a través de la capacitancia. Realiza una medición de humedad de suelo, en múltiples profundidades del perfil (cada intervalo de 10 cm.). Consiste en una sonda y un Datalogger de mano con un display para visualizar los datos. El sensor incluido en la sonda simplemente hay que hacerlo bajar y subir a través del tubo de acceso para que almacene las lecturas.



Fig.9 DIVINER 2000. Equipo portátil para monitoreo de humedad de suelos

El número de tubos de acceso colocados en la parcela fueron 6. Se colocaron en las parcelas 104, 210, 303, 114, 211 y 313. La toma de medidas de humedad fue realizada cada 8 días. Se realizaron medidas de humedad en cada uno de los tubos de acceso obteniendo lecturas a los 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 y 100 cm. de profundidad. Los datos obtenidos se pueden ver en una tabla ó en una gráfica: por perfiles individuales o los datos sumados por perfiles.

La medida en cada tubo se repitió 3 veces para posteriormente obtener una media. La primera medida se realizó el 6 de mayo de 2004.

4.7.5 Toma de muestras de biomasa aérea

Para estudiar las extracciones del cultivo se llevaron a cabo tomas de muestras de biomasa aérea. La recolección se llevó a cabo de forma manual, cogiendo una línea de 2 mt de longitud (1,4 m²):

- 1ª repetición: se toman muestras de hojas, tallos y zuros en las parcelas 1, 2, 3, 4 y 5.
- 2ª repetición: se toman muestras de hojas, tallos y zuros en las parcelas 1, 2, 3, 4, 5, 11, 12 y 13.
- 3ª repetición: se toman muestras de hojas, tallos y zuros de las parcelas 1, 2, 3, 4, 5, 11, 12 y 13.
- 4ª repetición: se toman muestras de hojas, tallos y zuros en las parcelas 11, 12 y 13.

Se tomaban las plantas y se separaban las hojas, tallos y zuros. Se introdujeron en bolsas de papel previamente pesadas y se metieron en la estufa a 70 °C durante 48-72 horas, de manera que transcurridas las mismas el grado de humedad del maíz es del 14 %. Se extrajeron de la estufa y se separó el zuro del grano. Posteriormente se pesaron cada una de las fracciones, obteniendo el peso seco. Así mismo se calculó el índice de cosecha, el rendimiento al 14 % de humedad, nitrógeno absorbido por el cultivo y nitrógeno absorbido por la parte aérea de la planta. La determinación del nitrógeno absorbido se realizó por el Método Kjeldhal.

4.7.6 Toma de muestras en cosecha

La cosecha se llevó a cabo el día 22 de noviembre de 2004 de forma mecánica.

Se cosecharon todos los tratamientos, obteniéndose los siguientes datos: peso fresco (g grano/ superficie control), humedad del grano, rendimiento (kg ha⁻¹ 14 % humedad) y peso específico y nitrógeno en grano.

4.7.7 Balance hídrico

El balance hídrico más comúnmente utilizado requiere de los siguientes parámetros: variación de la reserva de agua en el suelo (VR), lluvia, pérdidas por evapotranspiración, escorrentía y drenaje de la zona donde crecen las raíces. Este balance hídrico puede expresarse por la ecuación siguiente (Allen y col., 1998):

$$D = P + R - ET_c + VR - E$$

El drenaje (D) de agua del perfil radical de un cultivo se refiere al agua que se desplaza fuera de esta zona. El agua drenada fuera de la zona radical es la diferencia entre el contenido de agua del suelo y el máximo contenido de agua que éste puede tener.

La precipitación (P) es medida en pluviómetros de las estaciones meteorológicas. En este ensayo, los datos fueron obtenidos del pluviómetro de la estación de la finca experimental. Factores como intensidad de lluvia, velocidad de infiltración del agua en el suelo, cobertura vegetal y topografía provocan que sólo una parte de la precipitación penetre en el suelo. El concepto de lluvia efectiva (PE) indica la proporción de precipitación que puede estar disponible en la zona radical de la planta (Pacheco, 1981; Flores, H. E; Ruiz, J. A., 1998).

Las necesidades de riego, serán aquellas que consigan evitar que el cultivo sufra una situación de estrés hídrico durante un prolongado periodo de tiempo. En este ensayo el riego fue de dos tipos: aspersión e inundación.

La Evapotranspiración (ET_c) de un cultivo es el parámetro que más pérdida de humedad provoca en el balance hídrico. La evapotranspiración ha sido obtenida por el método Penman-Montheith (Allen y col., 1998).

Las variaciones de la reserva (VR), se obtuvieron mediante un sensor de capacitancia (Diviner 2000).

La escorrentía (E), puede calcularse mediante la ecuación del número de curva del Servicio de Conservación de suelos (SCS) del Departamento de agricultura de EE.UU. (USDA) (Williams *et al.*, 1990; Flores, H. E ; Ruiz, J. A., 1998). En nuestro caso se considera como 0 ya que la pendiente del terreno donde se llevó a cabo el ensayo era 0.

Una vez que se completa la fórmula, se obtiene el drenaje acumulado entre dos muestreos de humedad y es expresada en mm.

4.8 BALANCE DE NITROGENO

Una de las metodologías más aceptadas para cuantificar la dinámica del nitrógeno en el sistema suelo-planta, es la del balance de nitrógeno que simula procesos de ganancias, pérdidas y transformaciones del elemento en el sistema. De esta forma, se puede determinar la cantidad de fertilizante nitrogenado utilizado por el cultivo.

El balance de nitrógeno se realiza considerando la siguiente expresión (Meisinger y Randall), en la que se evalúan las entradas y las salidas al sistema suelo: planta durante el periodo de cultivo:

$$N_{\text{min}}_{\text{presembr}} + N_{\text{ mineral aplicado}} + N_{\text{ mineralizado}} + N_{\text{ aportado en el riego}} = N_{\text{ absorbido por el cultivo}} + N_{\text{ min postcosecha}} + N_{\text{ lixiviado}} + N_{\text{ no computado}}$$

ENTRADAS

N_{min} presembr: N_{min} en el perfil del suelo (0-90 cm) antes de la siembra (kg N ha⁻¹). Dato obtenido de las muestras de tierra analizadas en el laboratorio.

N mineral aplicado: dosis aplicada de N mineral en kg N ha⁻¹.

N mineralizado: N procedente de la mineralización de la materia orgánica durante el periodo de crecimiento del cultivo (kg N ha⁻¹). Estimado a través del tratamiento testigo (sin aportes de nitrógeno).

N aportado en el riego: cantidad de N calculado a partir de la dosis de agua utilizada y su concentración en nitratos disueltos.

SALIDAS

N absorbido por el cultivo: N absorbido por la parte aérea del cultivo (kg N ha⁻¹), incrementado en un 25% como estimación del N radical. Obtenido de las muestras de tierra analizadas en el laboratorio.

N_{min} postcosecha: N en el perfil del suelo (0-90 cm) después de la cosecha (kg N ha⁻¹). Dato obtenido de las muestras de tierra analizadas en el laboratorio.

N lixiviado en verano: pérdidas de N por lixiviación a causa de los riegos y las lluvias.

N no computado: es el N no controlado en el balance. Se considera nulo en el tratamiento testigo.

Cálculo de lixiviación de nitratos: en primer lugar se calcula el drenaje acumulado entre extracción y extracción de solución de las cañas y a continuación se multiplica por la concentración de nitratos media de cada periodo.

Cálculo del nitrógeno absorbido por la parte aérea: se calcula multiplicando el rendimiento obtenido de hojas y grano por sus porcentajes de nitrógeno calculados en el laboratorio.

4.9 ANALISIS ESTADISTICO

Los datos tomados en el ensayo se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA), con un grado de probabilidad del 5%. Si se presentaban diferencias significativas se procedía a realizar un Test de comparación de medias o Test de rango múltiple de Duncan. El programa informático utilizado fue SPSS 15.0 (Statistical Package for the Social Sciences)

5. RESULTADOS

5.1 RESPUESTA DEL MAIZ A LA FERTILIZACION NITROGENADA

En la Tabla 7 se muestran las producciones medias de maíz:

Tabla 7. Producciones medias de maíz (kg ha⁻¹) para los dos tipos de riego y dosis de fertilización.

Tratamientos kg N ha ⁻¹	Nmin+0	Nmin+240	Nmin+320
kg ha ⁻¹ (Aspersión)	7271	13104	13810
kg ha ⁻¹ (Inundación)	2819	9297	11647

El valor de N mineral en el momento de resiembra se muestra en el Anejo IV.

Se observa que los rendimientos de grano en los tratamientos control en los dos sistemas de riego son menores que en el resto de tratamientos, resultado lógico ya que la cantidad de Nmin que aporta el suelo no cubre las necesidades del cultivo y no se realiza ninguna aportación de nitrógeno. La diferencia de producción entre los tratamientos entre aspersión e inundación puede ser debida a los bajos niveles de N disponible en el suelo (0-90 cm) para el cultivo durante el ciclo del cultivo debido a su lavado debido por el excesivo riego. Uno de los principales factores que influyen en la respuesta del maíz, es la capacidad de suministro del nitrógeno por el suelo (Amir *et al.*, 1994; Michrina *et al.*, 1981).

Para comprobar si existen diferencias significativas debido a los dos factores aplicamos el análisis de varianza al rendimiento del cultivo (Tabla 8). Se observan diferencias significativas respecto al factor fertilización y al factor riego con una probabilidad del 95%. Sin embargo no existe interacción fertilización –tipo de riego.

Tabla 8. Análisis de varianza para el rendimiento del cultivo de maíz (kg ha⁻¹)

	F calculada	nivel de significación
Factor fertilización	73.30	0.000 ***
Factor riego	134.11	0.000 ***
Interacción fertilización-riego	2.79	0.08 n.s

(1): n.s; nivel de significación > 0,05; *, nivel de significación < 0,05, **; nivel de significación < 0,01; ***, nivel de significación < 0,001.

Por lo tanto, el rendimiento se ve afectado tanto por la dosis de fertilizante como por el tipo de riego utilizado.

Para confirmar la existencia de diferencias significativas se aplica el test de comparación de medias o test de rango múltiple de Duncan para los dos factores estudiados.

Los resultados se muestran en la Tabla 9:

Tabla 9. Rendimiento del maíz (kg ha⁻¹) para los diferentes factores ensayados

Factor	Variable	Medias (kg ha ⁻¹)	
Fertilización	Nmin+0 kg N ha ⁻¹	5.053	a
	Nmin+240 kg N ha ⁻¹	11.200	b
	Nmin+320 kg N ha ⁻¹	12.728	c
Riego	Aspersión	11.395	a
	Inundación	7.926	b

Dentro de un factor, medias seguidas de letras distintas indican diferencias significativas para un nivel de significación de 0,05.

El test de comparación de medias para los dos factores en estudio nos confirma (Tabla 9) la existencia de estas diferencias en ambos factores, presentando en el caso de riego por inundación una producción de 7.926 kg ha⁻¹ y en riego por aspersión una producción de 11.395 kg ha⁻¹. Se ha demostrado que existe una alta relación entre la oxigenación del suelo y el crecimiento, así como con la producción en las plantas de maíz. En este sentido Hoehler *et al.*, (1976) señalaron que niveles inadecuados de oxígeno en el suelo reducen la producción entre 32 y 47 % en el maíz. En este ensayo el rendimiento medio en el caso de inundación ha presentado un descenso del 35 % respecto al rendimiento del cultivo regado por aspersión. Melendez *et al.*, obtuvieron reducciones de hasta un 74 % en rendimiento de maíz en riego por inundación frente a aspersión. Estos rendimientos en la parcela bajo condiciones de inundación pueden ser resultado de la menor capacidad de suministro de nitrógeno por el suelo proveniente de la mineralización de nitrógeno orgánico y a que el nitrógeno mineral inicial puede estar sujeto a pérdidas por lixiviación. Para obtener rendimientos en condiciones de inundación similares a los de aspersión sería necesario realizar un aporte muy elevado de fertilizante nitrogenado.

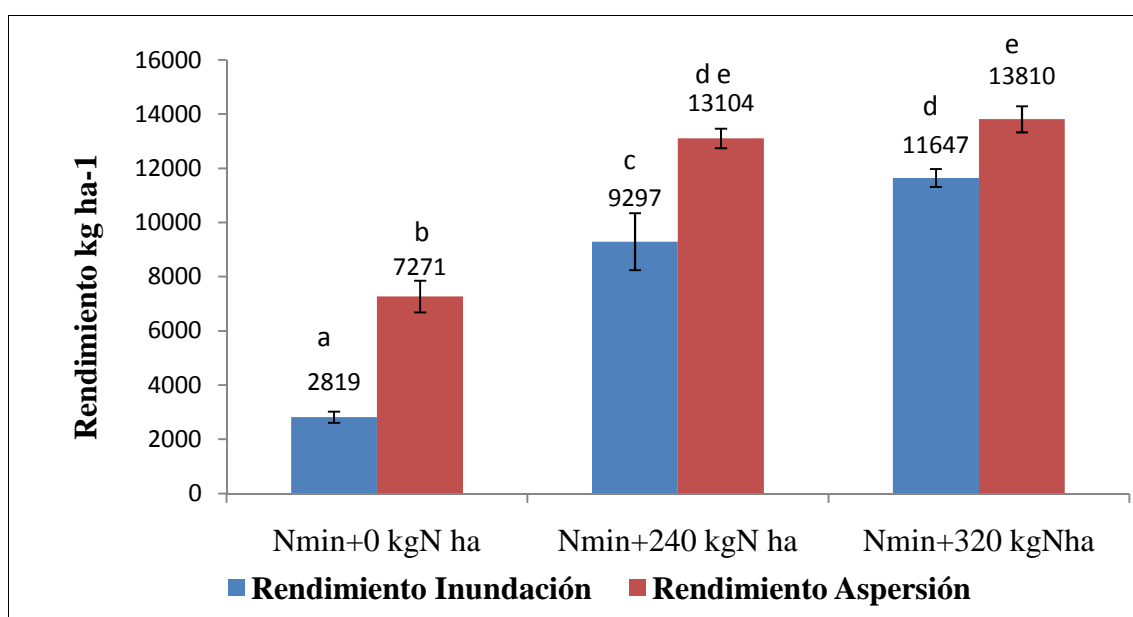
Así mismo en el factor fertilización existen diferencias significativas, estas se producen entre el aporte de 320 kg N ha⁻¹ (12.728 kg ha⁻¹) con respecto a la fertilizada con 240 kg N ha⁻¹ (11.200 kg ha⁻¹) y el testigo (5.053 kg ha⁻¹).

Empleamos el mismo test de comparación de medias para los diferentes tratamientos (Tabla 10) estudiados en el ensayo: fertilización testigo 0 kg N ha⁻¹ y aspersión (1), fertilización 240 kg N ha⁻¹ y aspersión (2), fertilización 320 kg N ha⁻¹ y aspersión (3), fertilización testigo 0 kg N ha⁻¹ e inundación (4), fertilización 240 kg N ha⁻¹ e inundación (5), fertilización 320 kg N ha⁻¹ e inundación (6). Los tratamientos están ordenados de menor a mayor en función del valor de los rendimientos medios.

Tabla 10. Rendimiento del maíz (kg ha⁻¹) para los tratamientos ensayados en aspersión e inundación.

Tratamientos	Medias (kg ha ⁻¹)	
Nmin+0 kg N ha ⁻¹ (4)	2.819	a
Nmin+0 kg N ha ⁻¹ (1)	7271	b
Nmin+240 kg N ha ⁻¹ (5)	9297	c
Nmin+320 kg N ha ⁻¹ (6)	11647	d
Nmin+240 kg N ha ⁻¹ (2)	13104	d e
Nmin+320 kg N ha ⁻¹ (3)	13810	e

En la Gráfica 2 se muestran los resultados obtenidos:



Gráfica 2. Rendimientos de maíz (kg ha⁻¹) para aplicaciones de dosis crecientes de N y dos sistemas de riego.

Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos para un grado de significación del 0,05

Se comprueba que hay un efecto significativo del factor riego sobre el rendimiento, así, los rendimientos en riego por inundación son inferiores a los de aspersión en los tres tratamientos. Un exceso de humedad en el suelo determina una aireación deficiente que afecta al desarrollo de la planta. Dicho exceso produce falta de O₂, lo que se manifiesta en una reducción de crecimiento, marchitamiento y/o clorosis; en nuestro ensayo se observa reducción de crecimiento de la planta y clorosis de las hojas. Ferrer Raul E; Selles van Sch Gabriel; Tosso Juan T, (1985), observaron descensos de rendimiento en cultivo de pimiento al realizar una aplicación excesiva de agua.

Dentro del riego por inundación vemos que el rendimiento aumenta a medida que lo hace la dosis de fertilizante nitrogenado. El mayor incremento de rendimiento se observa entre el tratamiento testigo (0 kg N ha⁻¹) y el tratamiento (240 kg N ha⁻¹). Esto puede explicarse ya que el contenido de nitratos en el perfil en el tratamiento testigo es bajo, con lo que el cultivo reacciona positivamente a un aporte de fertilizante nitrogenado. Sin embargo el incremento de rendimiento en el cultivo entre el tratamiento de 240 kg N ha⁻¹ y el de 320 kg N ha⁻¹ ha sido inferior. Esto nos lleva a pensar que a medida que el nitrógeno del suelo aumenta, la respuesta del cultivo a aportes de fertilizante nitrogenado es menor.

Fontanetto, Hugo; Keller, Oscar, (2006), obtuvieron menores incrementos de rendimiento en cultivo de trigo a medida que el nitrógeno total del suelo era más alto. Autores como (Bundy y Malone, 1988; Binford *et al.*, 1992; Hergert, 1987 y Barberis, 1983, indican que los contenidos de nitratos en el perfil del suelo afectan a la respuesta del cultivo a la aplicación del elemento.

Dentro del riego por aspersión vemos un comportamiento similar al riego por inundación.

5.1.1 Respuesta del rendimiento del cultivo del maíz a la fertilización nitrogenada en riego por aspersión.

Con el objetivo de calcular la dosis óptima de nitrógeno empleamos el mismo test de comparación de medias o test de rango múltiple Duncan para los diferentes tratamientos (Tabla 11) en riego por aspersión: fertilización testigo 0 kg N ha⁻¹ (1); fertilización 80 kg N ha⁻¹ (2), fertilización 160 kg N ha⁻¹ (3), fertilización 240 kg N ha⁻¹ (4), fertilización 320 kg N ha⁻¹ (5).

Tabla 11. Rendimiento del maíz (kg ha⁻¹) para los tratamientos ensayados en aspersión.

Tratamientos	Medias (kg ha ⁻¹)
Nmin+0 kg N ha ⁻¹ (1)	7271 a
Nmin+80 kg N ha ⁻¹ (2)	9734 b
Nmin+160 kg N ha ⁻¹ (3)	12133 c
Nmin+240 kg N ha ⁻¹ (4)	13104 c
Nmin+320 kg N ha ⁻¹ (5)	13810 c

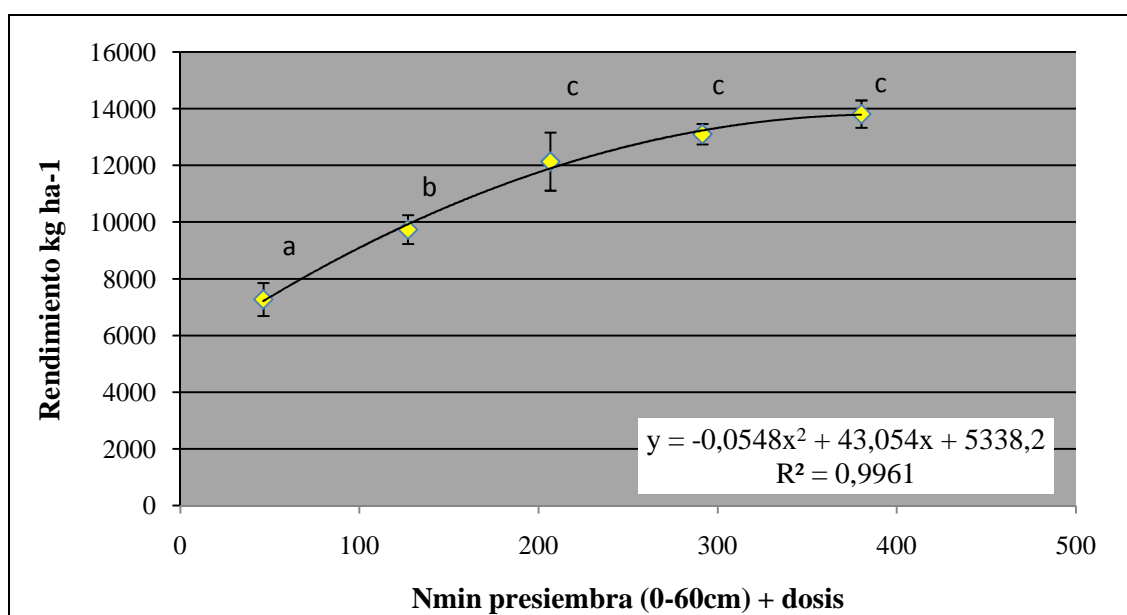
Medias seguidas de letras diferentes indican diferencias significativas para un nivel de significación del 0,05.

Se observa que con la aplicación de diferentes dosis de nitrógeno existen diferencias significativas.

Los tratamientos de fertilización muestran un aumento significativo de los rendimientos respecto del control presentando un aumento continuo a medida que aumenta la dosis de fertilización. También se observa que los incrementos de rendimiento son cada vez menores.

La ley de rendimientos de Mitscherlich (Mitscherlich, 1906), afirma que: “a cada incremento del factor limitante, elemento nutritivo que se encuentra en menor cantidad, corresponden incrementos de rendimientos en las cosechas cada vez más inferiores, hasta llegar a un incremento de rendimiento nulo e incluso negativo”.

La aplicación de nitrógeno sobre el cultivo de maíz provoca un aumento de biomasa y un mayor rendimiento. Con los resultados obtenidos se construye la curva de respuesta del cultivo a la aplicación de nitrógeno expresándose el resultado en kg ha^{-1} . En la Gráfica 3 se visualiza el ajuste del rendimiento al nitrógeno aplicado para todos los tratamientos en riego por aspersión. La curva se asemeja a las del tipo “cuadrático meseta”.



Gráfica 3. Rendimiento de maíz para diferentes dosis de nitrógeno y riego por aspersión. Letras distintas significan diferencias significativas para un nivel de significación de 0,05

Este tipo de curvas presenta tres tramos:

- Un primer tramo en el que existe respuesta a las aplicaciones de fertilizante nitrogenado. A medida que aumenta la dosis de fertilizante los rendimientos aumentan pero los incrementos del mismo cada vez son menores.

- Un segundo tramo donde no hay respuesta. A partir de cierta dosis no se producen aumentos de rendimiento por lo que la dosis óptima será la primera con la que se llegue a este tramo de no respuesta. Esta dosis óptima técnica se define por la línea horizontal.

- Un tercer tramo en el que el rendimiento de maíz desciende con el aumento de dosis de nitrógeno. Por lo tanto, seguir aumentando la dosis podría producir un descenso del rendimiento del cultivo por debajo de los valores de la meseta (toxicidad).

En la Gráfica 3 se verifica la respuesta a aplicación de fertilizante nitrogenado hasta 320 kg N ha^{-1} . En nuestro ensayo es necesario conocer un punto más de dosis ($N_{min}+400 \text{ kg N ha}^{-1}$) y así poder calcular el punto umbral o dosis óptima técnica. Como tal valor de fertilizante no se aplica al cultivo se determina que la dosis óptima técnica se sitúa entre la dosis de 240 kg N ha^{-1} y 320 kg N ha^{-1} .

Los rendimientos se relacionan de forma muy estrecha con la disponibilidad de nitrógeno, considerando la suma del N del fertilizante y el N en el suelo a la siembra:

$$\text{Rendimiento} = -0,0548 + 43,054 + 5338,2$$

$$R^2 = 0,9961$$

La correlación entre la disponibilidad de nitrógeno y el rendimiento en grano es 0,9961.

El nitrógeno es el principal elemento requerido para la producción de los cultivos de grano. Así, deficiencias de este elemento producen una reducción de la expansión foliar, provocan su prematura senescencia y afectan la tasa fotosintética, dando como resultado una menor producción de materia seca y grano.

La gestión de la fertilización nitrogenada afecta al rendimiento y calidad del maíz y a su vez los beneficios que percibe el agricultor dependen de ambos factores. Por otro lado, el peligro de la contaminación del agua por nitratos, también se ve afectada por la dosis de N aplicada. Todo ello, origina el diseño de estrategias de fertilización nitrogenada sensibles al estado de mercado y de la política medioambiental. Por lo tanto, los agricultores económicamente motivados desearán aplicar dosis de nitrógeno que maximicen los beneficios económicos considerando el rendimiento. Para ello demandarán un método sensible al estado de mercado para establecer la dosis óptima (Makowski *et al.*, 1999).

La dosis técnica óptima es aquella que permite obtener la máxima producción con el mínimo fertilizante nitrogenado aplicado. Es necesario observar la existencia de diferencias significativas entre tratamientos, si éstas no existen se toma aquella dosis menor con la cual se obtienen máximos rendimientos.

5.2 LIXIVIACION DE NITRATOS

En este ensayo se ha comprobado el lavado de nitrógeno nítrico para riego por aspersión e inundación así como para diferentes dosis de abono nitrogenado (0, 240 y 320 kg N ha⁻¹). El drenaje calculado combinado con la estimación de la concentración de nitratos en la solución del suelo mediante el uso de cápsulas porosas de succión, sirve para calcular la lixiviación de nitratos.

5.2.1 Balance hídrico

En las Tablas 12 y 13 se presentan los balances hídricos para los dos tipos de riego calculados por el método descrito en Materiales y Métodos (pág.)

Tabla 12. Balance hídrico durante el periodo de cultivo de maíz en riego por aspersión.

N fertilizante (kg N ha ⁻¹)	0	240	320
Lluvia (mm)	156,1	156,1	156,1
Riego (mm)	600	600	600
ETP (mm)	637,07	637,07	637,07
VR (mm)	-9,69	-5,93	-17,85
Drenaje (mm)	137,74	137,86	156,45

Tabla 13. Balance hídrico durante el periodo de cultivo de maíz en riego por inundación

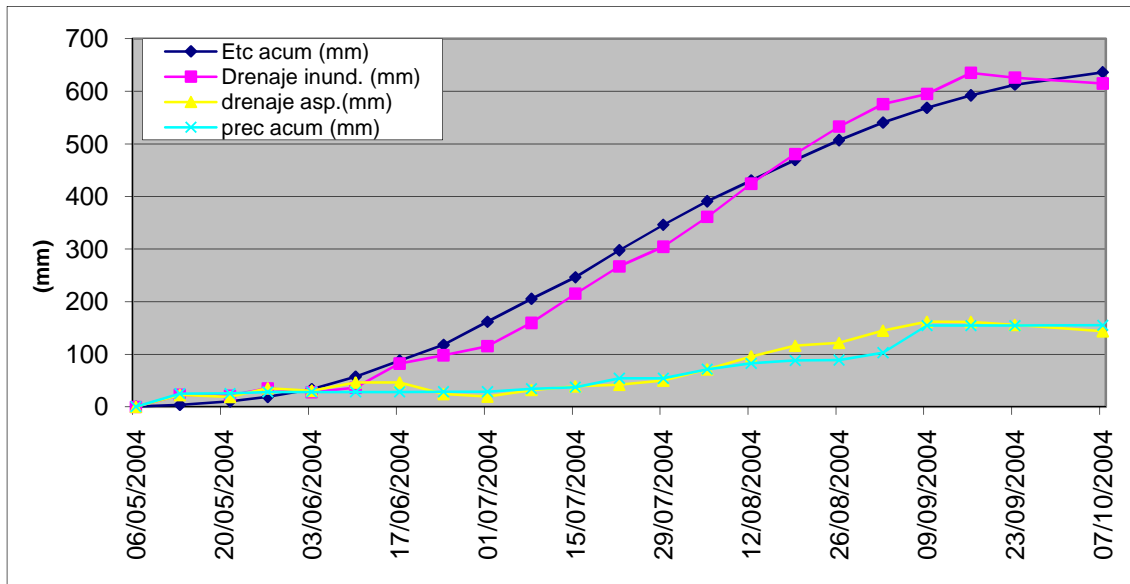
N fertilizante (kg N ha ⁻¹)	0	240	320
Lluvia (mm)	156,1	156,1	156,1
Riego (mm)	1082	1082	1082
ETP (mm)	637,07	637,07	637,07
VR (mm)	-17,94	-9,29	-8,23
Drenaje (mm)	619,41	616,87	608,11

Durante el periodo de cultivo la precipitación acumulada es de 156 mm El volumen de riego aplicado en aspersión es de 600 mm y en inundación es de 1082 mm. La cantidad aplicada en inundación es superior ya que el suelo se humedece al mismo tiempo que el agua cubre con una lámina de agua la superficie, por tanto la cantidad de agua que se consume es mayor que en aspersión.

Las necesidades hídricas van variando a lo largo del cultivo y cuando las plantas se encuentran en la primera fase vegetativa o fase de germinación, se requiere poca cantidad de agua, pero sí se requiere mantener una humedad constante que asegure la germinación de la semilla. Las precipitaciones que se

dan durante el mes de mayo, se acumulan en el perfil, asegurando humedad suficiente para la germinación y por tanto no se requiere la aplicación de riego. Se genera un pequeño drenaje tanto en aspersión como en inundación, sin presentar diferencias significativas ambos drenajes.

La Gráfica 4 muestra la evolución de los componentes (drenaje, riego, Etc y lluvia) del balance hídrico durante el periodo de cultivo.



Gráfica 4. Evolución de los componentes del balance hídrico determinados semanalmente.

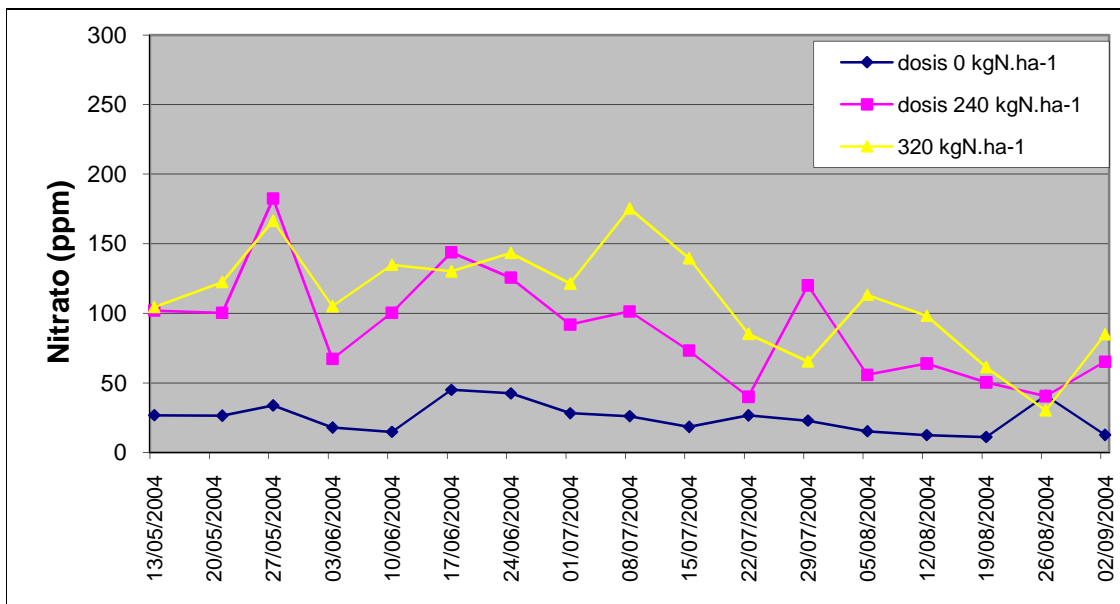
En la fase de crecimiento vegetativo se requiere una mayor cantidad de agua. A partir del 24 de mayo que coincide con el comienzo de la fase vegetativa del maíz se aplican 35 lm^2 de agua semanales en aspersión y 60 lm^2 de agua en inundación. Durante los meses de junio y julio el cultivo se encuentra entre sus fases vegetativas V_6 - V_8 y V_{14} , esta última en la que se produce la floración. Es una etapa crítica del cultivo en la cual presenta sus mayores necesidades hídricas. La Etc presenta sus mayores valores. Se aumenta la dosis de agua aportada, en aspersión se aportan 54 lm^2 y en inundación 90 lm^2 .

Las precipitaciones durante el periodo comprendido entre el 10/06/04 y 9/09/04 no son importantes, lo cual debería traducirse en incrementos poco importantes del drenaje, lo cual ocurre en las parcelas sometidas a aspersión; sin embargo en aquellas parcelas regadas mediante inundación se originan drenajes importantes, muy superiores a los de aspersión. Los valores obtenidos en drenaje en inundación son excesivos, ello puede ser debido al volumen de agua de riego aplicado en el caso de riego por inundación, que es 1,6 veces superior. También es importante a tener en cuenta que en este ensayo el riego por inundación es simulado, lo que conlleva a posibles errores como... tiempo de apertura de válvulas excesivo, cálculo erróneo de dosis de riego... etc.

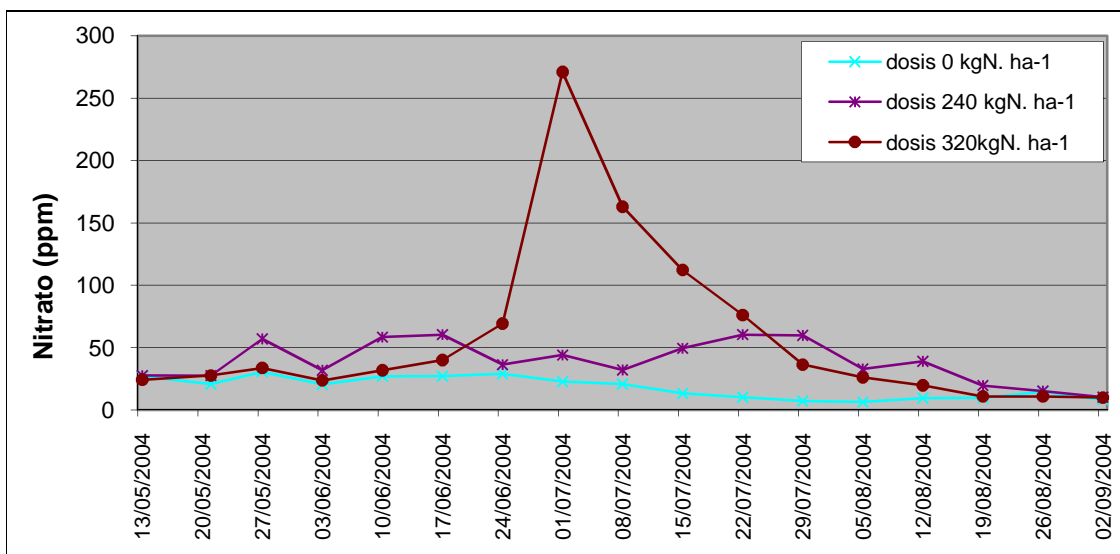
A partir del 15 de septiembre el cultivo entra en fase de maduración y secado, con lo que la cantidad de agua requerida por el cultivo disminuye. No se registraron precipitaciones, el valor de Etc fue bajo y no se aplicaron riegos. Debido a la falta de precipitaciones y riego no existió drenaje.

5.2.2 Concentración de NO^{-3} en cañas de vacío.

En las Graficas 5 y 6 se muestra la evolución de los nitratos en la solución del suelo en los dos tipos de riego.



Gráfica 5. Variación de concentración de nitratos (mg l^{-1}) en la solución del suelo en riego por aspersión.



Gráfica 6. Variación de concentración de nitratos (mg l^{-1}) en la solución del suelo, en riego por inundación.

La concentración inicial de nitratos en la solución de suelo en los tratamientos con riego por inundación es inferior a los observados en los tratamientos con riego por aspersión debido probablemente al lavado de nitrógeno nítrico del perfil del suelo durante la campaña anterior y a la ausencia de nitrógeno residual.

Tras la aplicación de la primera cobertera el 17 de junio era de esperar un aumento de la concentración de nitratos. En aspersión se observa un aumento en la concentración de nitratos tras la aplicación de la cobertera siendo mayor a medida que aumenta la dosis de fertilizante aplicada. Observamos un pico elevado en el tratamiento de 320 kg N ha⁻¹ en riego por inundación, este valor de NNO₃⁻, puede ser debido a varias causas:

- error en la medida.
- la aplicación en primera cobertera de 320 kg N ha⁻¹ puede dar lugar a un valor elevado.
- el valor puede no ser erróneo y lo que ocurre es que el error esté en el tratamiento de 240 kg N ha⁻¹, debiendo presentar también un pico y no lo presenta.

A partir de julio la concentración de nitratos disminuye, bien debido a que coincide con el periodo de máxima absorción de nitrógeno por parte de la planta o bien debido a que el nitrógeno se ha lixiviado debido a los riegos, siendo la disminución mayor en riego por inundación.

La concentración de nitratos al final del ciclo del cultivo en la solución del suelo es mayor en los tratamientos con riego por aspersión.

5.2.3 Lavado de nitratos

Aplicando el análisis de varianza a la lixiviación de nitrógeno nítrico (Tabla 14), se observan diferencias significativas respecto al factor fertilización y al factor riego con una probabilidad 95%.

Tabla 14. Análisis de varianza para nitratos lixiviados (kg NO⁻³ ha⁻¹)

	F calculada	nivel de significación (1)	
Factor fertilización	15,515	0,0495	*
Factor riego	33,055	0,029	*

(1): n.s; nivel de significación > 0,05; *, nivel de significación < 0,05, **; nivel de significación < 0,01; ***, nivel de significación < 0,001.

(2) En este caso la interacción riego x dosis no aparece ya que es un análisis de dos factores (riego y dosis) con una sola muestra por grupo

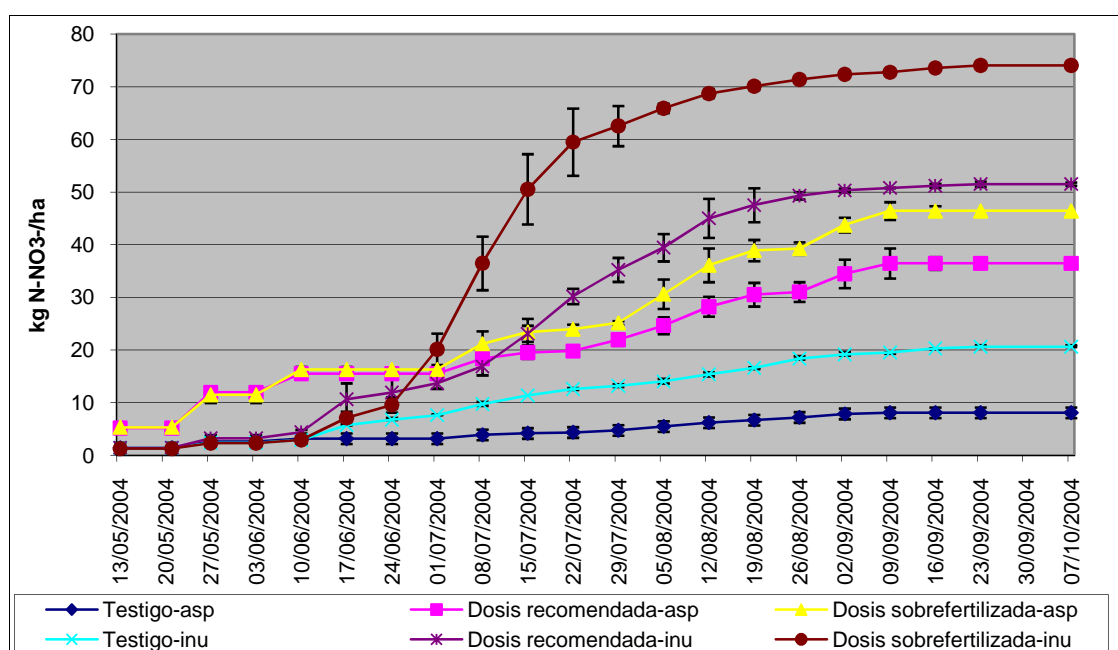
Ello nos indica que la cantidad de nitratos lixiviada se vio afectada tanto por la dosis fertilización como por el tipo de riego utilizado.

Las cantidades de nitrógeno nítrico total a lo largo del ciclo del cultivo de maíz se muestran en la Tabla:

Tabla 15. Lixiviación de nitrógeno nítrico acumulado ($\text{kg N NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$), para las diferentes dosis de nitrógeno y sistemas de riego.

Tratamientos kg N ha^{-1}	0	240	320
$\text{kg N NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$ (Aspersión)	8,098	36,452	46,420
$\text{kg N NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$ (Inundación)	20,609	51,517	74,049

En la Gráfica 7 se muestra la lixiviación de nitrógeno nítrico acumulado a lo largo de toda la campaña.



Gráfica 7. Lixiviación de nitrógeno nítrico acumulado para aspersión e inundación y diferentes dosis de fertilizante nitrogenado.

Comprobamos que los 4 tratamientos que presentan menos lixiviados corresponden a los tres tratamientos en los que se empleó el riego por aspersión y a la parcela testigo en riego por inundación y los dos que más lixiviados presentan son las parcelas fertilizadas en el sistema de riego por inundación es decir, se produce una mayor lixiviación de nitratos, como se esperaba. Si tenemos en cuenta la dosis de fertilizante, observamos que siguen el orden de fertilización testigo, 240 kg N ha^{-1} y 320 kg N ha^{-1} . Resultados similares fueron obtenidos por Arregui, L.M y col. (2005). Altos aportes de fertilizantes nitrogenados, implica un riesgo elevado de contaminación por nitratos (Adiscott *et al.*, 1991). En cuanto al sistema de riego, la humectación de la totalidad del suelo que se produce con el sistema de riego por inundación genera posteriormente unos altos volúmenes de drenaje del agua aplicada en exceso, lo cual favorece el lavado de los nitratos. En nuestro ensayo para iguales

tratamientos los lixiviados son superiores en riego por inundación. Con estos datos podemos concluir que el sistema de riego por inundación genera una pérdida de nitratos superior al sistema de riego por aspersión.

Ello puede ser debido al efecto del drenaje elevado en inundación que fueron 641 litros, frente a los 144 litros que se drenan en aspersión, lo cual incrementó la concentración de nitratos en agua.

La lixiviación de nitratos hacia zonas no explorables por el sistema radical, disminuye la disponibilidad de nitrógeno para los cultivos, además de ocasionar la contaminación del agua. Se ha observado que las pérdidas de nitrato aumentan con la dosis de nitrógeno aportada (Rasse et al.1999: Zhu y Fox. 2003). Así mismo, un cambio de sistema de riego por inundación a un sistema por aspersión, permitiría mejorar la eficiencia en el uso de nitrógeno disminuyendo las pérdidas por lixiviación.

5.3 BALANCE DE NITRÓGENO

En las Tablas 16 y 17 se muestran los resultados obtenidos en el balance de nitrógeno, para los riegos de aspersión e inundación y las diferentes dosis de fertilización.

Tabla 16. Componentes del balance de nitrógeno para riego por aspersión y dosis de 0, 240 y 320 kg N ha⁻¹

	kg N ha ⁻¹		
N fertilizante	0	240	320
Nmin presiembra	63 ± 3	86 ± 5	97 ± 10
N mineralizado	95	95	95
N riego	19	19	19
N total entradas	177 ± 3	440 ± 5	531 ± 10
N extraído (aérea)	93 ± 7	226 ± 12	236 ± 10
N extraído (raíces)	23 ± 2	56 ± 3	59 ± 2
Nmin postcosecha	53 ± 4	84 ± 32	103 ± 56
N lixiviado	8	36	46
N total salidas	177 ± 8	402 ± 34	444 ± 56
BALANCE FINAL	-	38 ± 34	87 ± 58
RENDIMIENTO kg ha⁻¹	6.070	11.480	11.810

Tabla 17. Componentes del balance de nitrógeno para riego por inundación y dosis de 0, 240 y 320 kg N ha⁻¹

	kg N ha ⁻¹		
N fertilizante	0	240	320
Nmin presiembra	56 ± 1	69 ± 9	63 ± 9
N mineralizado	34	34	34
N riego	33	33	33
N entradas	123 ± 1	376 ± 9	450 ± 9
N extraído (aérea)	47 ± 1	113 ± 16	154 ±
N extraído (raíces)	12 ± 0	28 ± 4	38 ± 3
N min postcosecha	44 ± 2	55 ± 3	66 ± 1
N lixiviado	20	52	74
N total salidas	123 ± 2	248 ± 17	332 ± 10
BALANCE FINAL	-	128 ± 19	118 ± 13
RENDIMIENTO kg ha⁻¹	2.450	8.040	10.080

Las entradas de nitrógeno para cubrir las necesidades nitrogenadas del cultivo de maíz fueron:

1. Nmin presiembra: proviene principalmente del nitrógeno de los fertilizantes no utilizado en el cultivo anterior, así como del nitrógeno procedente de la mineralización de los restos de cosecha enterrados en el suelo. El contenido en las parcelas testigo es menor que en las parcelas fertilizadas, ya que las testigo no reciben aporte alguno de fertilizante nitrogenado. La situación se repite tanto en aspersión como en inundación.

2. Nitrógeno mineralizado: obtenido a partir de las parcelas que no reciben dosis de fertilizante nitrogenado. La cantidad de nitrógeno mineralizado durante el ciclo del cultivo varía según temperatura y humedad. En nuestro ensayo las temperaturas no son extremas por tanto no influyeron sobre el proceso, sin embargo la humedad sí varía ya que utilizamos dos sistemas de riego diferentes. El valor obtenido en riego por aspersión es 95 kg N ha^{-1} y en riego por inundación 34 kg N ha^{-1} algo lógico ya que el exceso de humedad crea un ambiente pobre en oxígeno alterando la actividad y por tanto reduciendo la mineralización del la M.O.

Estos valores junto con el nitrógeno aportado por el agua de riego, y las dosis de fertilizante aplicadas, constituyen las entradas del balance de nitrógeno.

Las salidas de nitrógeno fueron:

1. Extracción de nitrógeno por la planta: aumenta al utilizar dosis crecientes de fertilizante y el valor mínimo se presenta en las parcelas sin aporte de nitrógeno. Hanway (1962), encontró que la menor absorción de nitrógeno en planta, ocurría en tratamientos o parcelas deficientes en nitrógeno. La extracción presenta los valores más altos (295 kg N ha^{-1} y 192 kg N ha^{-1}) en aquellas plantas que reciben la dosis más alta de fertilizante (320 kg N ha^{-1}) en riego por aspersión y por inundación respectivamente. ¿por qué en inundación valores menores? La falta de oxigenación provoca un menor crecimiento vegetativo de la planta con lo que la absorción de nitrógeno es inferior. También puede ser debido a la baja disponibilidad de nitrógeno en suelo debido al lavado del mismo por efecto del riego.

2. Nitrógeno lixiviado: en el caso de inundación los lixiviados son superiores ya que la cantidad de agua aportada al cultivo es superior, lo cual produce un lavado importante de nitratos.

3. Nmin postcosecha: aumenta tanto en el cultivo regado por aspersión como en el regado mediante inundación, a medida que aumenta el aporte de fertilizante nitrogenado. Los valores oscilan entre 53 kg N ha^{-1} y 103 kg N ha^{-1} en aspersión y 44 kg N ha^{-1} y 66 kg N ha^{-1} .

Aplicando la expresión del balance de nitrógeno (ver 8. de Mat. y Met.), se estima el nitrógeno mineralizado y a partir de él se llega a calcular el nitrógeno “no computado” que representa unas cantidades significativas de nitrógeno no controladas en el balance. El balance general de entradas y salidas del nitrógeno en el sistema suelo-planta para las variables estudiadas es positivo en riego por aspersión como en riego por inundación, lo cual supone que las entradas al sistema son superiores a las salidas del mismo.

Este valor positivo significa que:

- Las entradas se han sobreestimado por un error en el cálculo o al obtenerlas en el ensayo.
- Las salidas se han infravalorado por error o al obtenerlas en el ensayo
- Existen otras salidas que no se han tenido en cuenta: desnitrificación, volatilización...

En aspersión el ajuste del balance es mejor para la dosis de 240 kg N ha⁻¹, ya que la cantidad de nitrógeno no computado es menor que en la dosis de 320 kg N ha⁻¹. En inundación se observa que el nitrógeno no computado para la dosis de 240 kg N ha⁻¹ y la dosis de 320 kg N ha⁻¹ es 128 y 118 y kg N ha⁻¹ respectivamente. Teniendo en cuenta los errores, el ajuste del balance en los dos tratamientos es similar; para determinar que tratamiento es el mejor observamos los rendimientos. Para 240 kg N el rendimiento ha sido 8.040 kg ha⁻¹ frente a 10.080 kg ha⁻¹ para la dosis de 320 kg N ha⁻¹ luego el ajuste de balance es mejor para esta última dosis ya que tenemos un mayor rendimiento y una mayor entrada de nitrógeno en el sistema.

El nitrógeno absorbido por el cultivo para producir una tonelada de grano ha oscilado entre 19-25 kg N t⁻¹ grano, en parcelas regadas por aspersión y en parcelas regadas por inundación, se ha situado entre 18-24 kg N t⁻¹ grano.

En base a los resultados se calculan los parámetros CAU fertilizante, CAU Nmin presembrado así como la extracción de nitrógeno por el cultivo. Dichos parámetros se muestran en la Tabla 18:

Tabla 18. Coeficientes aparentes de utilización del nitrógeno (CAU) y extracción de nitrógeno por kg de grano.

Tipo de riego	Aspersión			Inundación		
	0	240	320	0	240	320
Dosis (kg N ha ⁻¹)	0	240	320	0	240	320
N extraído (kg N t ⁻¹)	19	25	25	24	18	19
CAU Nmin presembrado	1.84			1.05		
CAU Nmin fertilizante		0.7	0.6		0.4	0.4

Se puede ver que los valores del coeficiente CAU Nmin presiembra, son altos tanto en aspersión como inundación, por tanto se puede decir que la utilización del nitrógeno mineral del suelo en el momento de presiembra es alta, lo que nos indica que el cultivo ha realizado un buen aprovechamiento del nitrógeno mineral del suelo en el momento de la presiembra con lo que se puede en parte la dosis de fertilizante nitrogenado.

Los valores de CAU fertilizante se calculan como el cociente entre la diferencia de nitrógeno absorbido en cada tratamiento respecto al testigo y el nitrógeno aplicado y ello nos indica la eficiencia del cultivo en la utilización del fertilizante aplicado respecto al testigo. El mejor aprovechamiento del nitrógeno aplicado se detecta para aportaciones de 240kg N ha⁻¹ en aspersión, que corresponde a la dosis recomendada. En inundación el valor tanto para la dosis recomendada como la dosis sobrefertilizada es el mismo.

Los valores de CAU fertilizante en inundación respecto a aspersión son inferiores, esto nos indica el peor aprovechamiento del fertilizante en el cultivo sometido a riego por inundación, ya que gran parte es lixiviado y no puede ser utilizado por el cultivo.

6. CONCLUSIONES

- El rendimiento se ha visto afectado por la dosis de fertilizante nitrogenado y por el tipo de riego utilizado
- Los rendimientos han sido superiores en riego por aspersión con una media de $11.395 \text{ kg ha}^{-1}$ frente a 7.296 kg ha^{-1} en inundación.
- La aplicación de nitrógeno sobre el cultivo ha provocado un aumento de biomasa y un mayor rendimiento.
- La dosis óptima técnica se ha situado entre 240 kg ha^{-1} y 320 kg ha^{-1} .
- Para obtener rendimientos en condiciones de inundación similares a los de aspersión es necesario realizar un aporte muy elevado de fertilizante nitrogenado.
- La respuesta a la dosis de nitrógeno ha seguido una función cuadrática de respuesta decreciente al incrementar la dosis de nitrógeno.
- La cantidad de nitratos lixiviada se ha visto afectada tanto por la dosis de fertilizante como por el tipo de riego utilizado.
- El sistema de riego por inundación genera una pérdida de nitratos superior al sistema de riego por aspersión.
- La mayor cantidad de lixiviado de nitratos se genera para la dosis de 320 kg N ha^{-1} en riego por inundación.
- El balance general de entradas y salidas del nitrógeno en el sistema suelo-planta para las variables estudiadas ha sido positivo en riego por aspersión así como en riego por inundación, lo cual supone que las entradas al sistema son superiores a las salidas del mismo.

- La utilización del nitrógeno mineral del suelo en el momento de resiembra ha sido alta, lo que nos indica que el cultivo ha realizado un buen aprovechamiento del nitrógeno mineral del suelo.
- El nitrógeno absorbido por el cultivo para producir una tonelada de grano ha oscilado entre 19-25 kg N t⁻¹ grano, en parcelas regadas por aspersión y en parcelas regadas por inundación, se ha situado entre 18-24 kg N t⁻¹ grano.
- El peor aprovechamiento del fertilizante en el cultivo se ha producido en riego por inundación.
- El ajuste del balance ha sido mejor para riego por aspersión.
- De acuerdo con las condiciones del ensayo la dosis de 240 kg N ha⁻¹ es la óptima tanto económicamente como ambiental.

7. ANEJOS

ANEJO I

PROGRAMACIÓN DE RIEGO

		L m ⁻²		l.m ⁻² semana ⁻¹
	lunes	miércoles	viernes	Total
Junio				
Aspersión	11,9023	11,9023	11,9023	35,7069
Inundación	59,5115			59,5115
Julio				
Aspersión	18,2195	18,2195	18,2195	54,9590
Inundación	91,5983			91,5983
Agosto				
Aspersión	18,2195	18,2195	18,2195	54,9590

Inundación	91,5983			91,5983
Septiembre				
Aspersión	11,9023	11,9023	11,9023	35,7069
Inundación	59,5115			59,5115

ANEJO II.

ESCALA FENOLÓGICA DEL MÁIZ.

V: ESTADOS VEGETATIVOS

- Ve: Emergencia.
- V1: 1ª hoja desarrollada.
- V2: 2ª hoja desarrollada.
- V3: 3ª hoja desarrollada.
- V4: 4ª hoja desarrollada.
- V5: 5ª hoja desarrollada.
- V6: 6ª hoja desarrollada.
- V7: 7ª hoja desarrollada.
- V8: 8ª hoja desarrollada.
- V9: 9ª hoja desarrollada.
- V10: 10ª hoja desarrollada.

Vt: Panojamiento.

R: ESTADOS REPRODUCTIVOS

R1: Emergencia de estigma.

R2: Cuaje (Ampolla).

R3: Grano lechoso.

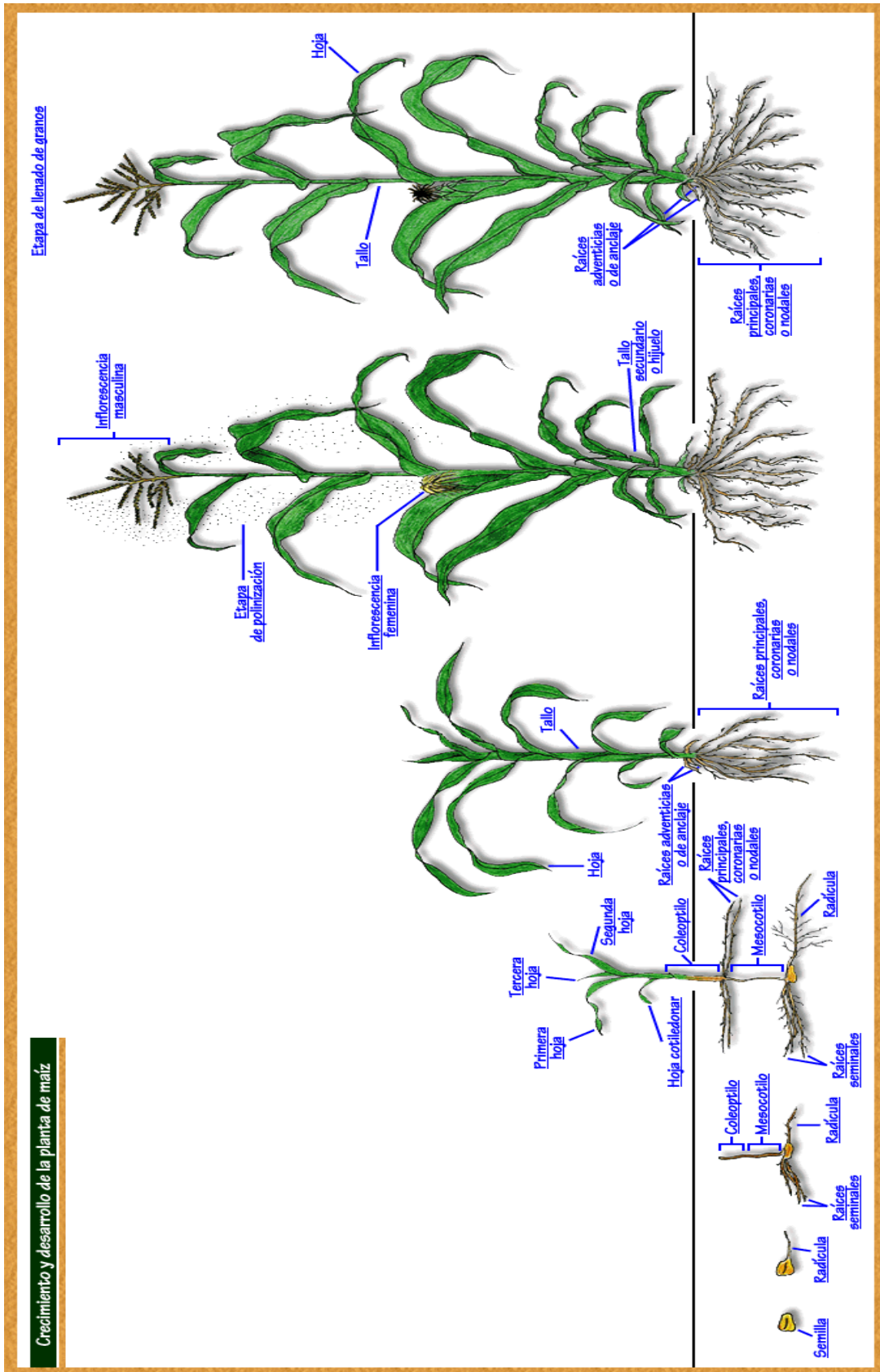
R4: Grano pastoso.

R5: Dentado.

R6: Madurez fisiológica.

Nota: Se considera una hoja completamente desarrollada cuando se observa el collar completamente desarrollado. Extraído del Libro “Ecofisiología del cultivo de maíz” de F. Andrade et al. 1996; : 17-18.

Fuente: Ritchie y Hanway, 1982. Elaboración propia.

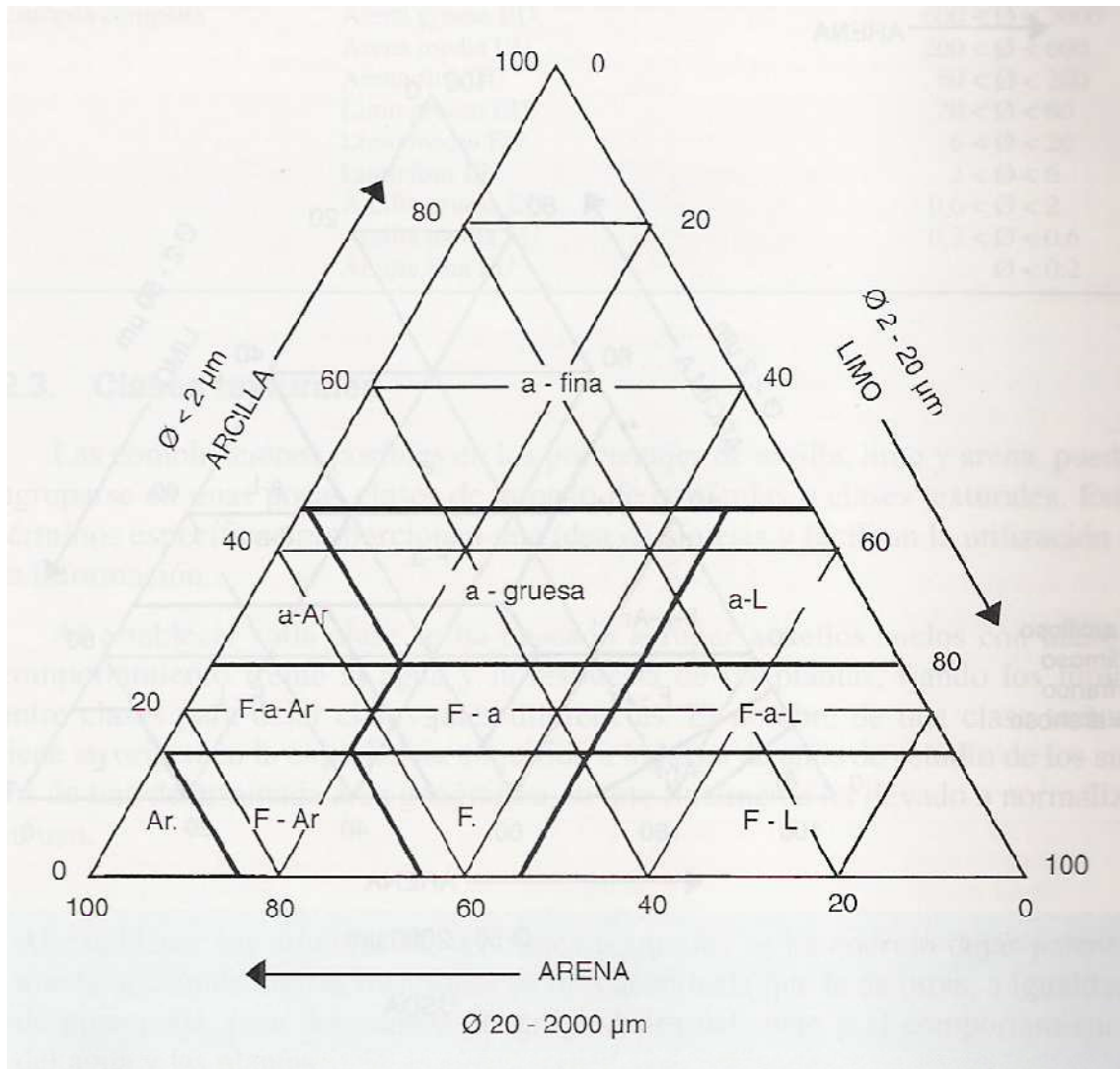


Crecimiento y desarrollo de la planta de maíz

Crecimiento y desarrollo de la planta de maíz

ANEJO III.

CLASES TEXTURALES



a: arenosa
Ar: arcillosa
F: franca
L: limosa

ANEJO IV.

VALORES DE Nmin EN PRESIEMBRA (0-60CM)

Aspersión

Tratamiento (kg N ha ⁻¹)	0	80	160	240	320
Nmin (kg N ha ⁻¹)	46,39	47,08	46,58	51,48	60,17

Inundación

Tratamiento (kg N ha ⁻¹)	0	240	320
Nmin (kg N ha ⁻¹)	42,14	48,39	44,04

11. BIBLIOGRAFÍA

1. **ADDISCOTT, TM ., WHITMORE, AP., POWLSON, DS.** (1991): *“Farming, fertilizers ant the nitrate problem”*. CAB Internacional. Wallingford, UK citado por **ARREGUI, L.M., MAEZTU, I., QUEMADA, M.** (2005): *“Estimación del drenaje y lavado de nitratos en un sistema de cultivo de cereal de invierno en condiciones de secano y clima mediterráneo húmedo.”* Estudios de la zona saturada del suelo, Vol. VII: 137-14.
2. **ADETUNJI, M.** (1994): *“Nitrogen application and undergrownd water contamination in some agricultural soils of South Western Nigeria”*. Fertilization Research 37: 159-163
3. **AMIR, J., MUFRADI,I.,KLITMAN,S., ASIDO,S.** (1994): *“Long-term comparativa study of soil nitrate test, gilán plant indicator meted and wheat nitrogen uptake”*. Plant and soil, Núm. 158: 223-231.
4. **ARAUZO, M., DIEZ, J.A., HERNAIZ, P** (2003): *“Estimación de balances hídricos y lixiviación de nitratos en sistemas agrícolas”*. Estudios de la zona no saturada del suelo, vol.VI: 39-44.
5. **ARCHER, J** (1988): *“Soil and plant análisis”*. Crop nutrition and fertilise use, 2nd edition, cap.12: 136-147
6. **ARREGUI, L.M., MAEZTU, I., QUEMADA, M.** (2005): *“Estimación del drenaje y lavado de nitratos en un sistema de cultivo de cereal de invierno en condiciones de secano y clima mediterráneo húmedo.”* Estudios de la zona saturada del suelo, Vol. VII: 137-143.
7. **BANDEL, V., DZIENIA, S., STANFORD,G.** (1980): *“Comparison of N fertilizers for no-till corn”*. Agronomy Journal, Núm 72: 337-341. citado por **MARTENS, D.** (2000): *“Nitrogen cycling under different systems”*. Advances in Agronomy, Vol. 70: 143-192.
8. **BARRACO, M., DÍAZ, M** (2005): *“Momento de fertilización nitrogenada de cultivos de maíz en hapudoles típicos”*. Ciencia del suelo, vol.23, núm.2: 197-203.º BB
9. **BAUDER, J.W., SINCLAIR, K.N., LUND, R.E** (1993): *“Phisiographic and land use characteristics associated with nitrate-nitrogen in Montana groundwater”*. Journal environment quality, 22: 255-262 citado por **PERDOMO, C.H., CASANOVA, O.N., CIGANDA, V.S** (2000): *“Contaminación de aguas subterráneas con nitratos y coliformes en el litoral sudoeste del Uruguay”*. Agrociencia, vol. 5, núm.1: 10-22.
10. **BINFORD, G., BLACKMER, A., CERRATOM.** (1992): *“Relationships between corn yields and soil nitrate in Late Spring.”* Agronomy Journal Vol.84: 53-59.

11. **BUNDY, L., MALONE, E.** (1988): *“Effect of residual profile nitrate on corn response to applied nitrogen”*. Soil.Sci.Soc.Am.J. 52: 53-59, citado por MELÉNDEZ, L., LIZASO, J., RAMÍREZ, R. (2001): *“Efecto de la fertilización nitrogenada sobre dos variedades de maíz (Zea mays L.) sometidas a exceso de humedad en el suelo”*. Bioagro. 3: 111-116.
12. **CAO, W., TIBBITS, T.W.** (1994): *“Responses of potatoes to solution pH levels with different forms of Nitrogen”*. Journal of plant nutrition, Vol. 17:109-126. citado por GALLEGOS, C., OLIVARES, E., VAZQUEZ, R., ZAVALA, F. (2002): *“Absorción de nitrato y amonio por plantas de nopal en hidroponía”*. Terra, Vol.18, Núm. 2: 133-139.
13. **DELGADO, R.** (2001). *“Respuesta del maíz a la aplicación de nitrógeno y su relación con la disponibilidad del elemento en dos suelos de Venezuela: producción de materia seca y grano”*. Agronomía Tropical, Vol.51: 387-403.
14. **DIEZ, J.A.** (1999): *“Optimización de la fertilización nitrogenada, procedimientos de análisis de suelo, toma de muestras y elección del tipo de fertilizante”*. Edafología, Vol. 6: 73-84.
15. **DOMINGO, F., SERRA, J., ROSELLO, A., TEIXIDOR, N** (2005): *“Lavado de nitratos en un cultivo de maíz con diferentes tipos de riego”*. Estudios de la zona no saturada del suelo, vol. VII: 115-118.
16. **DRURY, C.F., TAN, D.S., GAYNOR, J.D., OLOYA, T.O., WELACKY, T.W** (1996): *“Influence of controlled drainage-subirrigation on surface and tile drainage nitrate loss”*. Journal Environmental Quality, vol. 25: 317-324.
17. **ESTRADA, M., NIKOLSKII, I., GAOI, F., ETCHEVERS, J., PALACIOS, O.** (2002): *“Balance de nitrógeno inorgánico en una parcela con drenaje subterráneo en el trópico húmedo”*. Terra, Vol. 20, Núm: 189-198.
18. **ETCHEVERS, J.D** (1999): *“Técnicas de diagnóstico útiles en la medición de la fertilidad del suelo y es estado nutrimental de los cultivos”*. Terra, vol.17, núm.3: 209-219.
19. **FOX, R., ROTH, G.W., IVERSEN, K. V., PIEKELEK, W.P** (1989): *“Soil and tissue nitrate test compared for predicting soil nitrogen availability to corn”*. Agronomy journal, vol. 81: 971-974.

20. **GALUIS, S.A., ETCHEVERS, J.D., RODRIGUEZ, S** (1993): *“Estimación de los rendimientos máximos alcanzables en maíz en áreas de temporal del estado de Tlaxcala”*. Terra, vol.11: 93-99 citado por ETCHEVERS, J.D (1999): *“Técnicas de diagnóstico útiles en la medición de la fertilidad del suelo y es estado nutrimental de los cultivos”*. Terra, vol.17, núm.3: 209-219.
21. **GALLEGOS, C., OLIVARES, E., VAZQUEZ, R., ZAVALA, F** (2000): *“Absorción de nitrato y amonio por plantas de nopal en hidroponía”*. Terra, vol.18, núm.2: 133-139.
22. **GALLEGOS, C., OLIVARES,E., VAZQUEZ, R., ZAVALA,F.** (2002): *“Absorción de nitrato y amonio por plantas de nopal en hidroponía”*. Terra, Vol.18, Núm. 2: 133-139.
23. **GANDRUP, M., GARCIA, F., FABRIZZI, K., ECHEVERRIA,H.** (2004): *“Evolución de un índice de verdor en hoja para evaluar el status nitrogenado en trigo”*. RIA, Vol.3, Núm.33: 105-121.
24. **HAGEMAN, R.** (1992): *“Ammonium versus nitrate nutrition of higher plants”*. In: R.D.Hauck, J.D.Beaton, CAI. Goring, R.G., Hoeft, G.W. Randall y D.A Russel (eds). *Nitrogen in crop production* citado por GALLEGOS, C., OLIVARES,E., VAZQUEZ, R., ZAVALA,F. (2002): *“Absorción de nitrato y amonio por plantas de nopal en hidroponía”*. Terra, Vol.18, Núm. 2: 133-139.
25. **HALLBERG, G.R** (1989): *“Nitrate in ground water in the United States, in nitrogen Management and groundwater protection”*. Developments in Agricultural and management forest ecology 21, edited by R.F. Follet Elsevier, New York: 35-75, citado por ORTUZAR, M.A., AIZPURUA, A., CASTELLON, A., ALONSO, A., ESTAVILLO, J.M (2003): *“Evolución del contenido de nitrato y amonio en lixiviados bajo diferentes formas de fertilización nitrogenada en trigo”*. Estudios de la zona no saturada del suelo, Vol. VI.
26. **HATFIELD, J.L., ALLEN, R.G** (1996): *“Evapotranspiration estimates under deficient water supplies”*. Journal irrigation drainage eingenering, vol. 122: 301-308 citado por RAMOS, C., KÜCKE, M (1999): *“Revisión crítica de los métodos de medida de la lixiviación de nitrato en los suelos agrícolas”*. Estudios de la zona no saturada del suelo. Eds, Muñoz, r., Ritter, A., Tascón, C: 25-32.
27. **HOEHLER, T., GRATUS, R., SCHAND, H., EGLE, K.** (1976): *“Influence of oxygen on dry matter production and daily changes of CO2 uptake”*. Photosynthetica 10: 59-70 citado por MELÉNDEZ, L., LIZASO, J., RAMÍREZ, R. (2001): *“Efecto de la fertilización nitrogenada sobre*

dos variedades de maíz (*Zea mays L.*) sometidas a exceso de humedad en el suelo”. *Bioagro* 3: 111-116.

28. **IRAÑETA, I., ARMESTO, A.P., SEGURA, A., LAFARGA, A., ARREGUI, L., MERINA, M., BAROJA, E., QUEMADA, M.** (2002): “*Herramientas de ayuda a la decisión para el manejo correcto de los fertilizantes nitrogenados en cereales de invierno*”. *Navarra Agraria* 133: 6-15.
29. **IRAÑETA, I., ARMESTO, A.P., SEGURA, A., LAFARGA, A., ARREGUI, L., MERINA, M., BAROJA, E., QUEMADA, M.** (2003): “*Herramientas de ayuda a la decisión II: para el manejo correcto de los fertilizantes nitrogenados en maíz*”. *Navarra Agraria* 138: 10-18.
30. **KALULI, J.W., MADRAMOTO, CH., ZHOU,X., MACKENZIE, A., SMITH, D.** (1999): “*Subirrigation systems to minimize nitrate leaching*”. *Journal Irrigation Drainage of Engineering*, Vol. 125: 52-58.
31. **KESSAVALOU, A., DORAN, J.W., POWERS, W.L., KETTER, T.A., QUIAN, J.H** (1996): “*Bromide and nitrogen-15 tracers of nitrate leaching under irrigated corn in Central Nebraska*”. *Journal Environmental Quality*, vol.25: 1008-1014.
32. **KOLBERG, R., ROUPERT, D., WESTFALL,D., PETERSON, G.**(1997): “*Evaluation of an situ net soil nitrogen mineralization method in dryland agroecosystems*”. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, Núm. 61: 504-508.
33. **KÜCKE, M., KLEEGERG, P** (1997): “*Nitrogen balance and soil nitrogen dynamics in two areas with different soil, climatic and cropping conditions*”. *European Journal Agronomy*, vol.6: 89-100 citado por
34. **LIANG, B.C., McKENZIE, A.F.** (1994): “*Changes of soil nitrate-nitrogen and denitrification as affected by nitrogen on two Quebec Soils*”. *Journal Environment Quality*, Núm. 23: 521-525.
35. **LUCEY, K.J., GOOLSBY, D.A** (1993): “*Effects of climatic variations over 11 years on nitrate-nitrogen concentrations in the Raccoon river, Iowa*”. *Journal Environment Quality*, Vol. 22: 38-46.
36. **MALDONADO, J.M.** (1993): “*Asimilación del nitrógeno y del azufre*”. *Fisiología y Bioquímica vegetal*. Interamericana-McGraw-Hill, Madrid, citado por GALLEGOS, C., OLIVARES,E., VAZQUEZ, R., ZAVALA,F. (2002): “*Absorción de nitrato y amonio por plantas de nopal en hidroponía*”. *Terra*, Vol.18, Núm. 2: 133-139.
37. **MARTENS, D.** (2000): “*Nitrogen cycling under different systems*”. *Advances in Agronomy*, Vol. 70: 143-192.

38. **MARTINEZ, M., GARCÍA-LINARES, C., SANCHEZ-PEREZ, J.M., AIZPURUA, A., RUIZ DE LOIZAGA, J., ANTIGÜEDAD, I** (2003): “*Lixiviación de nitratos bajo cultivo de remolacha en la zona vulnerable del acuífero cuaternario de Vitoria-Gasteiz (País Vasco)*”. Estudios de la zona no saturada del suelo, vol. VI: 25-32.
39. **MEISINGER, J.** (1984): “*Evaluating plant-avaible nitrogen in soil-crop systems*” citado por DELGADO, R. (2001). “*Respuesta del maíz a la aplicación de nitrógeno y su relación con la disponibilidad del elemento en dos suelos de Venezuela: producción de materia seca y grano*”. Agronomía Tropical, Vol.51: 387-403.
40. **MEISINGER, J.J., BANDEL, V.A., ANGLE, J.S., OKEEF, B.E., REYNOLDS, C.M** (1995): “*Presidedrees soil nitrate soil nitrate test evaluation in Maryland*”. Soil scientific society of American journal, vol. 56: 1527-1532.
41. **MELÉNDEZ, L., LIZASO, J., RAMIREZ, R** (2001): “*Efecto de la fertilización nitrogenada sobre dos variedades de maíz (Zea mays L.) sometidas a exceso de humedad en el suelo*”. Bioagro, vol.13: 111-116.
42. **MELÉNDEZ, L., LIZASO, J., RAMÍREZ, R.** (2001): “*Efecto de la fertilización nitrogenada sobre dos variedades de maíz (Zea mays L.) sometidas a exceso de humedad en el suelo*”. Bioagro. 3: 111-116.
43. **MENGEL, K.** (1991): “*Avaiible nitrogen in soils and its determination by the Nmin method and by electroultrafiltracion*”. Fertilization Research citado por DIEZ, J.A. (1999): “*Optimización de la fertilización nitrogenada, procedimientos de análisis de suelo, toma de muestras y elección del tipo de fertilizante*”. Edafología, Vol. 6: 73-84
44. **MENGEL, K., KIRKBY, E.A.** (1987): “*Principles of plant nutrition*”. 4th ed. International Potash Institute, Bern citado por GALLEGOS, C., OLIVARES, E., VAZQUEZ, R., ZAVALA, F. (2002): “*Absorción de nitrato y amonio por plantas de nopal en hidroponía*”. Terra, Vol.18, Núm. 2: 133-139.
45. **MEYER, R. D., MARCUM, D.B** (2004): “*Potato yield, petiole nitrogen and soil nitrogen response to water and nitrogen*”. Agronomy journal, vol.90: 420-429.
46. **MICHRINA, B., FOX, R., PIEKELEK, W.** (1981): “*A comparison of laboratory, greenhouse and field indicators of nitrogen availability*”. Commun. Soil. Sci. Plant. Anal. Vol. 12: 519-535, citado por

- DELGADO,R. (2001). “*Respuesta del maíz a la aplicación de nitrógeno y su relación con la disponibilidad del elemento en dos suelos de Venezuela: producción de materia seca y grano*”. *Agronomía Tropical*, Vol.51: 387-403.
47. **MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DE GANADERÍA DEL GOBIERNO DE NAVARRA** (1997): “*Código de buenas prácticas agrarias*”. 118 pgs.
48. **NOLAN, B.T** (1999): “*Nitrate behavior in ground Waters of the southearten USA, Reston*”. *Journal Environment Quality*, 28:1518-1527.
49. **ONGLEY, E.D** (1997): “*Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos*”. Estudio FAO, riego y drenaje, núm. 55, FAO Roma, Italia.
50. **ORTUZAR, M.A., AIZPURUA, A., CASTELLON, A., ALONSO, A., ESTAVILLO, J.M** (2003): “*Evolución del contenido de nitrato y amonio en lixiviados bajo diferentes formas de fertilización nitrogenada en trigo*”. *Estudios de la zona no saturada del suelo*, Vol. VI.
51. **PERDOMO, C.H., CASANOVA, O.N., CIGANDA, V.S** (2000): “*Contaminación de aguas subterráneas con nitratos y coliformes en el litoral sudoeste del Uruguay*”. *Agrociencia*, vol. 5, núm.1: 10-22.
52. **PIEKELEK, W. P., FOX, R.H** (1992): “*Use a chlorophyll meter to predict sidedress N requirements for maize*”. *Agronomy journal* vol.84: 59-65 citado por BARRACO, M., DÍAZ, M (2005): “*Momento de fertilización nitrogenada de cultivos de maíz en hapudoles típicos*”. *Ciencia del suelo*, vol.23, núm.2: 197-203.
53. **PIRELA, M.F., CLAVERO, T., FERNANDEZ, L., SANDOVAL, L** (2006): “*Balance de nitrógeno en el sistema suelo-planta con pasto Guinea (*Panicum maximum* Jacq) en condiciones de bosque seco tropical*”. *Revista Facultad de Agronomía (LUZ)*, vol.23: 80-91.
54. **PRUNTY, L., GREENLAND, R** (1997): “*Nitrate leaching using two. Potato-corn N-fertilizer plants on sandy soil*”. *Agriculture Ecosystems & Environment*, vol.65: 1-13 citado por VILLAR, J.M., VILLAR, P., STOCKLE, C., FERRER, F., ARAN, M (2002): “*On-farm monitoring of soil nitrate-nitrogen in irrigated cornfields in the Ebro Valley (Northeast Spain)*”. *Agronomy journal*, vol. 94: 373-380.
55. **RAMOS, C., AGUT, A** (2002): “*Nitrate leaching in important crops of de Valencian Community region (Sapin)*”. *Environmental pollution*, vol. 118: 215-223 citado por VILLAR, J.M., VILLAR, P., STOCKLE, C.,

- FERRER, F., ARAN, M (2002): “*On-farm monitoring of soil nitrate-nitrogen in irrigated cornfields in the Ebro Valley (Northeast Spain)*”. Agronomy journal, vol. 94: 373-380.
56. **RAMOS, C., KÜCKE, M** (1999): “*Revisión crítica de los métodos de medida de la lixiviación de nitrato en los suelos agrícolas*”. Estudios de la zona no saturada del suelo. Eds, Muñoz, r., Ritter, A., Tascón, C: 25-32.
57. **RASSE, DP ., RITCHIE, JJ., PETERSON, WT., LOUDON, TL., MARTIN, EC.** (1999): “*Nitrogen management impacts on yield and nitrate in imbred maize systems*”. Journal of Environmental Quality, Vol. 28: 1365-1371.
58. **RICHARDS, R.P., BAKER, D.B., CREAMEER, N.L., KRAMER, J.W., EWING, D.E., MERRY FIELD, B.J., WALLRABENSTEIN, L.K** (1996): “*Well water quality well vulnerability and agricultural contamination in the midwerstern United States*”. Journal Environement Quality, 25: 384-402 citado por PERDOMO, C.H., CASANOVA, O.N., CIGANDA, V.S (2000): “*Contaminación de aguas subterráneas con nitratos y coliformes en el litoral sudoeste del Uruguay*”. Agrociencia, vol. 5, núm.1: 10-22.
59. **RIMSKI-KORSAKOV, H., ALVAREZ, M., LAVADO, R.S** (2005): “*Predicción de los nitratos a cosecha de maíz en suelos de la Region Pampeana*”. Informaciones Agronómicas, num.27: 1-10.
60. **SAGLIO, P., RAUMOND, P., PRADET, A.** (1980): “*Metabolic activity and energy charge of excised maize root tips under anoxia*”. Plant physiologie. 66: 1053-1057 citado por MELÉNDEZ, L., LIZASO, J., RAMÍREZ, R. (2001): “*Efecto de la fertilización nitrogenada sobre dos variedades de maíz (Zea mays L.) sometidas a exceso de humedad en el suelo*”. Bioagro 3: 111-116.
61. **SAN MARTIN, C** (1991): “*El riego en maíz*”. Navarra agraria, núm. :25-31.
62. **SIMS, J.T., VASILAS, B.L., GARTLEY, K.L., MILLIKEN, B., GREEN, V** (1995): “*Evaluation of soil and plant nitrogen test for maize on manured soils of the atlantic coastal plain*”. Agronomy journal, vol. 87: 213-222.
63. **VAZQUEZ, N., QUEMADA, M., PARDO, A., SUSO, M.L** : “*Evaluación del lavado de nitratos en un cultivo de tomate en riego por goteo y acolchado plástico*”. Temas de investigación en zona no saturada. Eds, J.J.Lopez, M.Quemada.

64. **VILLAR, D., ORTEGA, R** (2003): “*Bases teóricas y su aplicación para la fertilización nitrogenada en cultivos*” *Agronomía y Forestal*, núm.18: 4-8.
65. **VILLAR, J., VILLAR”, P., STOCKLE,C., FERRER,F., ARAN,M.** (2002): “*On-farm monitoring of soil nitrate-nitrogen in irrigated cornfields in the Ebro Valley (Northeast Spain)*”. *Agronomy Journal*, Vol. 94: 373-380.
66. **VILLAR, J.M., VILLAR, P., STOCKLE, C., FERRER, F., ARAN, M** (2002): “*On-farm monitoring of soil nitrate-nitrogen in irrigated cornfields in the Ebro Valley (Northeast Spain)*”. *Agronomy journal*, vol. 94: 373-380.
67. **VILLAR, P., VILLAR, J.M., FERRER, F., ARAN, M** (2000): “*Optimización de la fertilización nitrogenada en maíz en suelos calcáreos del área regada por los canales de Urgell (Lleida)*”. *Invest. Agrar. Prod. Prot. Veg.*
68. **ZHU, Y., FOX, RH.** (2003): “*Corn-soybean rotation effects on nitrate leaching*”. *Agronomy Journal*, Vol. 95: 1028-1033.