

## TP N°6

### UNIDAD N° 6

**Riego. Oferta y demanda hídricas. Metodologías para evaluar la disponibilidad de agua superficial y subterránea. Evaluación de la calidad del agua para riego. Tolerancia salina de los cultivos. Requerimientos de lixiviación. Evaluación de las eficiencias de riego. Elaboración de curvas de demanda.**

#### **Equipo docente:**

Ing. Agr. Leopoldo J. Génova (Dr. M. Sc.), Profesor Titular Ordinario

Ing. Agr. Ricardo Andreau, Profesor Adjunto Ordinario

Ing. Agr. Marta Etcheverry (M. Sc.) Jefe de Trabajos Prácticos Ordinario

Ing. Agr. Pablo Etchevers, Jefe de Trabajos Prácticos

Ing. Agr. Walter Chale, Ayudante Diplomado

Ing. Agr. Luciano Calvo Ayudante Diplomado

Ing. Agr. Facundo Ramos Artuso, Ayudante Diplomado

#### **Índice de contenido**

1. Riego y drenaje: generalidades.
2. El riego y drenaje en la República Argentina.
3. Aspecto socioeconómico del riego.
4. Caracterización de la oferta y demanda hídricas. Aplicaciones.
5. Oferta hídrica. Disponibilidad de agua: cantidad y calidad de agua para riego. Distintas fuentes de aprovechamiento con fines de riego.
6. Metodologías para evaluar la cantidad de agua superficial y subterránea disponibles.
  - 6.1. Agua superficial.
  - 6.2. Agua subterránea.
7. Evaluación de la calidad de agua para riego. Objetivos. Relaciones causa-efecto de la calidad del agua en el sistema agroproductivo y forestal.
  - 7.1. Métodos de evaluación de la aptitud del agua para riego. Clasificaciones: descripción y uso.
  - 7.2. Directrices para evaluar la calidad de agua para riego.
  - 7.3. Tolerancia salina de los cultivos.
  - 7.4. Requerimiento de lixiviación. Concepto, estimación y aplicaciones.
  - 7.5. Eficiencias de conducción y aplicación de agua en los sistemas regados.

8. Demanda hídrica. Métodos de caracterización. Curvas de demanda.
9. Bibliografía

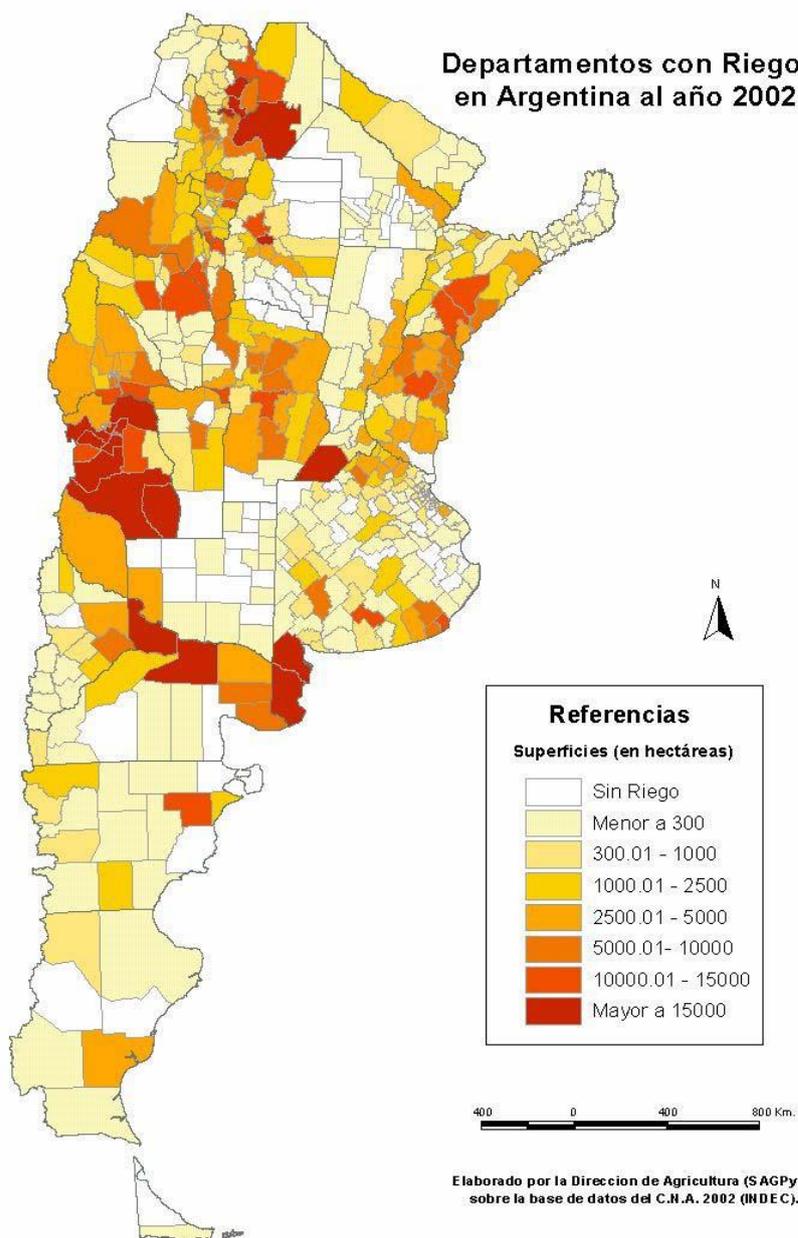
## **1. Riego y drenaje: generalidades.**

El riego se define como la aplicación artificial de agua al terreno con el fin de suministrar a las especies vegetales, la humedad necesaria para su desarrollo en la medida que no sea aportada por las lluvias, satisfaciendo la demanda con alta eficiencia en el uso del agua. Implica la regularización de la humedad del suelo mediante la aplicación de agua al suelo, en la zona de mayor actividad de extracción hídrica ocupada por raíces.

Israelsen y Hansen (1979), a mediados del siglo XX, dijeron: la presión demográfica y las necesidades de cantidades adicionales de alimento, imponen el desarrollo rápido del regadío en todo el mundo, que si bien reviste capital interés para las regiones áridas, desempeña un papel cada vez más importante en las regiones húmedas.

Estas aseveraciones se han cumplido, la superficie bajo riego en el mundo creció más del 30% en los últimos 50 años y en la Argentina, el riego complementario se ha difundido en las provincias de Buenos Aires, Córdoba, Chaco, Entre Ríos, Formosa, Salta, Santa Fe y Tucumán, siendo notable el incremento del área regada en la Pampa Húmeda, el Sur y Sudeste bonaerenses, ubicando a Buenos Aires en el segundo Estado más regado del país, detrás de Mendoza. (Génova et al, 1994).

## Departamentos con Riego en Argentina al año 2002



Provincia	Área regada (ha)	% en país
Bs. As.	166.482,90	12,28
Catamarca	61.847,60	4,56
Chaco	7.550,30	0,56
Chubut	18.154,80	1,34
Córdoba	93.834,80	6,92
Corrientes	59.014,40	4,35
Entre Ríos	71.736,20	5,29
Formosa	4.001,50	0,30
Jujuy	91.574,60	6,76
La Pampa	4.714,80	0,35
La Rioja	41.817,00	3,08
Mendoza	267.888,80	19,76
Misiones	170,00	0,01
Neuquén	15.798,00	1,17
Río Negro	72.780,30	5,37
Salta	118.898,00	8,77
San Juan	79.516,40	5,87
San Luis	18.575,10	1,37
Santa Cruz	3.840,60	0,28
Santa Fe	37.421,30	2,76

Sgo del Estero	53.954,10	3,98
T. del Fuego	0,40	0,00
Tucumán	66.024,90	4,87
<b>Totales</b>	<b>1.355.596,80</b>	<b>100,00</b>

En épocas Prehistóricas, los primeros asentamientos humanos, probablemente en los valles mesopotámicos de los ríos Éufrates y Tigris, en el Valle del Nilo, en India y en China, iniciaron el uso del agua con fines de riego, procurando el desarrollo de una agricultura estable. En América, las culturas Maya, Azteca, Tabasca e Inca sorprendieron a los conquistadores españoles con obras de regadío, que incluían diques, canales de riego y drenaje, sistematización de tierras e incluso métodos de subirrigación. El aprovechamiento generalizado del agua en la agricultura, relativamente reciente, se produjo a partir del siglo XVIII, con la Revolución Industrial y va incrementándose enfáticamente desde mediados del siglo XIX, acompañando el crecimiento demográfico de la humanidad.

El éxito de grandes proyectos de riego de los últimos años y la productividad obtenida por ellos, ha contribuido a desarrollar técnicas que, a su vez, generaron métodos mejorados de aprovechamiento y conservación de los recursos hídricos y edáficos, logrando sistemas sustentables y de elevada eficiencia en la conversión de energía.

No obstante el esfuerzo permanente aplicado en el desarrollado de las nuevas técnicas de riego y en la experiencia acumulada, se cierne sobre las áreas regadas el riesgo de la degradación de los principales recursos naturales (salinización del suelo, contaminación de acuíferos, impactos ambientales negativos, entre otros). En América Latina y el Caribe, entre el 40 y el 45 % de las tierras bajo riego y drenaje se encuentran degradadas (Génova, 1990).

La demanda de alimentos y otras materias primas crece con el incremento poblacional mundial, por lo que es necesario formar recursos humanos en las disciplinas del riego y drenaje, que deberán ser los encargados de planificar y operar los sistemas regados que impactarán en más tierras de las zonas áridas y húmedas, para incrementar su productividad y disminuir el riesgo de obtención de cosechas.

Se pueden distinguir dos tipos de riegos:

**Riego integral:** es el que se suministra a los cultivos durante todo su ciclo o durante gran parte del mismo, debido a la insuficiencia hídrica natural. Es el riego que se practica en los oasis de las zonas áridas y semiáridas.

**Riego complementario:** es el que se aplica en zonas húmedas y subhúmedas, suplementando o complementando los aportes por lluvias, que por sí solos no satisfacen los requerimientos hídricos de la mayoría de los cultivos.

La ciencia y tecnología del riego y drenaje no se limitan a la aplicación y evacuación de agua, sino que comprende todo el proceso de manejo de los recursos, en todos los escenarios productivos, con sus tamaños y complejidad asociados, desde la cuenca hidrográfica, el oasis regado o distrito de riego, el establecimiento agrícola, forestal, ganadero, mixto, (finca, chacra, plantación, estancia, vivero, tambo, monte), hasta las unidades de riego (fracciones del terreno regado mediante distintos métodos y equipamiento (surcos, círculos regados por pivote central, melgas, líneas de goteo, laterales de aspersión, franjas regadas por cañones viajeros y enrolladores, taipas arroceras, vidrieras e invernáculos con riego localizado, etc.) y desde éstas hasta los grandes colectores de drenaje, pasando por las redes de drenaje parcelario, troncal y zonal.

A los profesionales con formación agrohidrológica les incumbe la identificación y jerarquización de los problemas que se presentan en las fuentes de agua, en las tierras y cultivos regados, en la infraestructura de obras y servicios para la captación, conducción, regulación y administración del recurso hídrico, en las redes y cuerpos receptores de aguas de drenaje. El proceso ingenieril continúa, una vez resuelta su factibilidad técnica, económica y financiera, con la formulación de las acciones preventivas y correctivas para solucionar los problemas y la ejecución o el control de la ejecución de dichas acciones, finalizando con la evaluación de los resultados logrados, que deberán ser utilizados en planificaciones futuras.

Este algoritmo, que resume la función del ingeniero: estudiar el caso con sus antecedentes para diagnosticar la situación física y social e identificar problemas, proponer sus soluciones, evaluar la viabilidad técnico-económica, realizar o supervisar las actividades para solucionar los problemas y evaluar los resultados, que siempre sirva para retroalimentar el proceso de planificación, debe aplicarse, con las adaptaciones necesarias, en todos los escenarios y niveles de competencia, asociados a la calidad de su formación y su experiencia.

Como el riego altera inexorablemente los flujos de materia y energía de los ecosistemas naturales, pues es intrínsecamente una acción antrópica con diferentes riesgos de degradación, debe absolutamente considerarse siempre la necesidad de mantener el drenaje natural de las tierras, o incrementarlo artificialmente, para contribuir a la sustentabilidad de los sistemas productivos mediante el manejo de los balances hídricos y salinos, dentro de rangos previamente definidos, previniendo o combatiendo los procesos degradativos.

Drenaje agrícola: conjunto de metodologías de estudios y prácticas tendientes a la eliminación de excedentes de agua que afecten particularmente la obtención de cosechas y la sustentabilidad de los sistemas agroproductivos, en especial los recursos naturales agua y suelo.

En consecuencia, el riego y el drenaje abarcan la problemática de regularizar el régimen de humedad del suelo, previniendo y controlando los déficit y excesos hídricos, tendiendo a mantener un rango óptimo de humedad edáfica, compatibilizando la demanda evapotranspirativa de los cultivos con la oferta de agua superficial y subterránea, coincidiendo en tiempo, espacio y cantidad, maximizando los rendimientos fisiológicos y económicos, utilizando los recursos agua y suelo con criterios conservacionistas.

Los sistemas productivos bajo riego que no surjan de adecuados estudios y cuya implementación, operación y mantenimiento no se realice teniendo en cuenta los principales factores físicos, económicos y humanos, como por ejemplo tipos de suelos, clima, vegetación, profundidad del acuífero freático, equipamiento, formación de los recursos humanos, rentabilidad y muchos otros, serán irremediablemente inviables.

### 1. 1. Ingeniería de riego.

El riego es una práctica agronómica que se viene desarrollando en el mundo a partir de los primeros asentamientos agrícolas de los pueblos más antiguos de la humanidad.

Las obras y el manejo del agua para riego y drenaje, han sido siempre fuertes indicadores del desarrollo alcanzado por las sucesivas civilizaciones de los cinco continentes. Diques, canales, desagües y sistemas de riego y drenaje construidos en la antigüedad, algunos aún en funcionamiento, constituyen ejemplos de la actividad ingenieril de los pueblos.

Los avances científicos y tecnológicos logrados a nivel mundial en el estudio y manejo del agua con fines de riego, ha acompañado al desarrollo de la agricultura, aunque sin haber logrado aún un grado de transferencia a los usuarios, que contribuya al mejoramiento de su calidad de vida. Este es el desafío de la ingeniería de riego actual, no sólo generar más y mejores conocimientos, sino generalizar la incorporación de tecnologías disponibles, muchas incluso ya adaptadas a los escenarios físicos y socioeconómicos regionales, para que los usuarios del riego sean realmente los primeros beneficiarios del desarrollo.

El riego abarca un conjunto de técnicas cuyo objetivo principal es regularizar el régimen de humedad del suelo, en la zona rizosférica, para lograr optimizar el rendimiento fisiológico y económico de los cultivos, manteniendo la sostenibilidad de los agrosistemas productivos. Este objetivo debe convertirse en el paradigma de la ingeniería de riego.

Como se verá más adelante, específicamente al estudiar los métodos de riego, una clasificación preliminar de los mismos sería la siguiente:

a) Métodos de riego superficiales. La aplicación de agua al suelo se realiza desde su superficie, generando un proceso de infiltración. Son de dos tipos:

a.1) Métodos superficiales gravitacionales (los más generalizados son los métodos de surcos y de amelgas), requieren la ocurrencia de procesos de escurrimiento para distribuir el agua en la zona de raíces de los cultivos.

a.2) Métodos superficiales aéreos. Aplican agua sin necesidad de utilizar el escurrimiento para lograr su distribución areal. Los más comunes son los métodos de aspersión y de goteo.

b) Métodos de riego subterráneos. Aplican agua directamente en la rizósfera, si que ocurra infiltración. No son muy comunes, implican el manejo del agua subterránea (subirrigación) o la distribución mediante tuberías enterradas.

Antes de estudiar las distintas metodologías de aplicación de agua a los cultivos, abordaremos temas comunes a todos los métodos, como son la evaluación de la oferta y demanda de agua, su aptitud para el uso agrícola y los conceptos de eficiencias.

## 2- El riego y drenaje en la República Argentina.

La radicación en el país del ingeniero italiano C. Cipolletti en 1888, inició la etapa de racionalización del uso del agua de los ríos, en especial por la construcción de nuevos diques y canales.

La empresa nacional Agua y Energía Eléctrica contribuyó enormemente a la creación de los distritos de riego argentinos, teniendo a su cargo los estudios, proyectos, construcción, mantenimiento y administración de las obras de captación, embalse, regulación, conducción y manejo del agua superficial.

La aparición en el mercado nacional de dos elementos hidráulicos fundamentales, como la cañería de aluminio con acoples rápidos y la bomba de profundidad, en la década de 1940 y su construcción local, marcaron la iniciación del aprovechamiento intenso del agua subterránea; produciéndose una gran ampliación de la superficie bajo riego. A partir de 1970, con el desarrollo de la industria del material plástico, se consolidó la oferta de tuberías para la conducción, aplicación y eliminación de agua, que significaron la constante ampliación y la diversificación del aprovechamiento hídrico con fines de riego y drenaje.

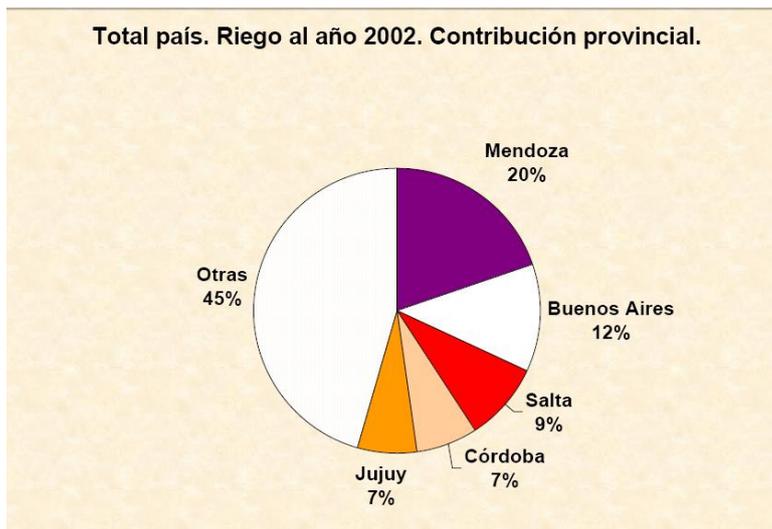
El uso del agua subterránea produjo grandes cambios en la utilización del recurso, permitiendo la introducción y aplicación de métodos de riego modernos como la aspersión y el riego localizado (microaspersión y goteo). Además, el desarrollo tecnológico agronómico e hidráulico, permitió avanzar en el uso de la tierra, en base a la disponibilidad de materiales genéticos de alto rinde adaptables al manejo agrohidrológico, al mejoramiento de la conducción, aplicación y avenamiento del agua, la preparación del suelo, la protección de cultivos y la sistematización del suelo. También los métodos de riego por amelgas y surcos evolucionaron en la misma medida en que cambió el uso más eficiente del recurso hídrico.

Las regiones nacionales con mayor aprovechamiento de sus recursos hídricos son paradójicamente aquéllas donde son más escasos. Cuyo, el Noroeste, la región central, y el Comahue superan a la Mesopotamia, la región Pampeana y la Patagonia.

La superficie argentina bajo riego, según el Censo Agropecuario Nacional 2002 es la siguiente:

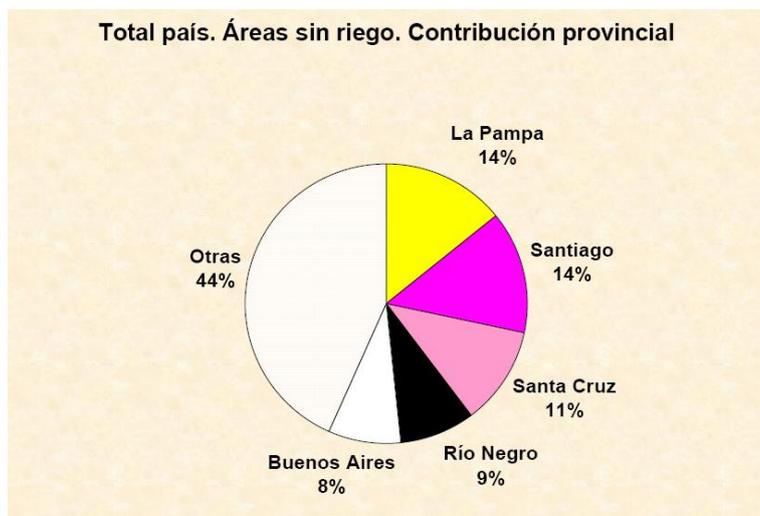
TOTAL PAÍS	REGADO (ha)	% en el país
Mendoza	267.888,80	19,76
Buenos Aires	166.482,90	12,28
Salta	118.898,00	8,77
Córdoba	93.834,80	6,92
Jujuy	91.574,60	6,76
Otras		45,51
Subtotal en el país	1.355.596,80	0,49 %

**Total país. Riego al año 2002. Contribución provincial.**



TOTAL PAÍS	SIN RIEGO (ha)	% en el país
La Pampa	6.773.200,00	14,30
Santiago	6.595.900,00	13,92
Santa Cruz	5.406.700,00	11,41
Río Negro	4.112.100,00	8,68
Buenos Aires	3.915.300,00	8,27
Otras		43,42
Subtotal en el país	47.371.600,00	17,04 %

**Total país. Áreas sin riego. Contribución provincial**



Elaboración de la Dirección de Agricultura (SAGPyA) basada en datos del INDEC.

**Superficie regada por cultivo.**

Cultivos	Superficie (ha)	Cultivos	Superficie (ha)
Vid	370.000	Alfalfa	54.000
Hortalizas	235.000	Cereales	33.500
Frutales	222.000	Forestales	27.000
Industriales	168.000	Olivos	24.200
Forrajeras	155.000		

La distribución espacial y temporal de los recursos hídricos argentinos es muy irregular. Los recursos hídricos superficiales (cuerpos y cursos de agua) son mucho más abundantes en la zona húmeda que en la árida, donde se cumple el mayor uso de las aguas disponibles. El horizonte de expansión de la superficie nacional bajo riego, es muy amplio, basado en nuevos aprovechamientos y en el incremento de las eficiencias en los usos actuales.

### **3. Aspecto socio-económico del riego.**

La viabilidad de desarrollo socioeconómico en las regiones áridas, depende principalmente de la existencia de una fuente de agua aprovechable con fines de riego integral. La economía del agua es vital para el sostén de la actividad humana.

En las regiones húmedas, el aprovechamiento de recursos hídricos en riego complementario contribuye a minimizar el riesgo de pérdida parcial o total de cosechas e incrementar y estabilizar los rendimientos fisiológicos y económicos de los cultivos. Aquí debe primero incorporarse toda la tecnología de cultivo disponible y luego incorporar la práctica del riego. (Génova, 1995)

Las explotaciones agropecuarias y forestales bajo riego, se caracterizan por la intensidad en el manejo de los recursos, demandando mayores cantidades y calidades de materia (insumos) y de energía (combustibles, dinero, información y comunicaciones, planificación y manejo tecnológico) que las explotaciones extensivas. Para su funcionamiento exigen un importante aporte de capital, requieren altas inversiones iniciales y elevados costos de producción, por lo que los beneficios económicos sólo se logran con niveles de producción muy rentables.

Por otro lado, la disponibilidad de recursos hídricos está cada día más comprometida, debido a la disminución de la oferta por contaminación y al aumento de la demanda por la competencia propuesta por sus usos alternativos (humano, agrícola, ganadero, industrial, recreativo, generación de energía). Esto hace indispensable manejar el aprovechamiento de los recursos hídricos con criterios que aseguren la sostenibilidad de los sistemas productivos, en última instancia, con racionalidad.

### **4. Caracterización de la oferta y demanda hídricas. Aplicaciones.**

Para diagnosticar la situación de un territorio respecto de los recursos hídricos disponibles y aprovechables y realizar estudios y proyectos para accionar en los campos de la Hidrología Agrícola, el Riego y el Drenaje, es fundamental caracterizar la oferta y demanda hídricas.

La oferta está representada por tres grandes formas de presentación en la naturaleza, de las masas de agua: la atmosférica, la superficial y la subterránea.

La demanda integrará parcial o totalmente los requerimientos de agua de los sistemas agropecuarios y forestales, no solo las necesidades hídricas de las plantas sino las pérdidas en los sistemas de captación, almacenamiento, conducción y aplicación y otros requerimientos de manejo.

Las principales aplicaciones de la caracterización de la oferta y demanda hídrica son:

- Estudios hidrológicos a nivel de parcela, distrito y cuenca hidrográfica. Balances hídricos. Erosión. Conservación de los recursos hídricos.
- Estudios y proyectos hidráulicos de captación, conducción, almacenamiento, regulación y evacuación de excedentes hídricos. Construcción, operación y mantenimiento de obras. Administración de los recursos hídricos.
- Proyectos integrales de riego y drenaje.
- Programas operativos de riego.

### **5. Oferta hídrica. Disponibilidad de agua: cantidad y calidad de agua para riego. Distintas fuentes de aprovechamiento con fines de riego.**

La disponibilidad de agua para riego integra dos características fundamentales, la cantidad, expresada en volumen y/o caudal y la calidad o aptitud para riego, ya que para establecer la posibilidad de aprovechamiento, no alcanza con definir la cantidad de agua en función de su probabilidad de existencia y su accesibilidad, en términos de viabilidad económica de su captación, sino que esté acompañada de una aptitud determinada, sujeta a manejo agronómico que asegure la sostenibilidad de los agroecosistemas.

No solo interesa la factibilidad de uso actual del recurso hídrico, sino evaluar el impacto ambiental que dicho uso implique. En términos agroecológicos, es necesario conocer, estimar, prevenir y controlar las posibles degradaciones del medio, principalmente el suelo agrícola y los cuerpos de agua superficiales y subterráneos, de tal manera de mantener la productividad, la confiabilidad, la equidad, la adaptabilidad, la estabilidad y la resiliencia de los agroecosistemas.

Si bien toda intervención del hombre en la naturaleza, provoca disturbios o deterioros de distinta naturaleza, magnitud y duración en diferentes sitios del medio, el conocimiento de la calidad del recurso hídrico es la primera acción para hacer factible su aprovechamiento, y aplicar sistemas de manejo agronómico bajo riego sustentables.

## **6. Metodologías para evaluar la cantidad de agua superficial y subterránea disponibles.**

### **6.1. Agua superficial.**

Las masas de agua contenidas en reservorios naturales y artificiales, pueden ser cubicadas midiendo, con distintas metodologías, las dimensiones del vaso, generalmente la superficie del espejo de agua y su profundidad. La superficie obtenerse de variadas formas, desde la medición directa manual mediante cintas métricas o métodos menos exactos (luz entre postes de alambrado, pasos, odómetros de vehículo), procedimientos trigonométricos, uso de niveles taquimétricos y teodolitos, distanciómetros, y también mediante la interpretación de aerofotointerpretación, la fotogrametría, la interpretación de imágenes satelitales, la lectura de escala de planos, el uso de software específico (GIS, modelos digitales del terreno, GPS, etc. La profundidad del cuerpo de agua implica la utilización de métodos batimétricos desde manuales (escandallos, reglas) hasta utilizando instrumental sofisticado (sondas, sonares, radar, etc.) El volumen hallado, se transforma en caudal, asignándose un tiempo de captación, derivación o aprovechamiento.

Para pronosticar la ocurrencia de caudales en cauces (canales, ríos, arroyos), existen básicamente dos métodos:

- Basados en el uso de series históricas de caudales (máximos, mínimos, medios)

Los datos de caudales provienen de aforos realizados en el pasado, organizados en bases de datos o series de registros históricos. Esta información generalmente es obtenida, procesada y guardada o publicada por organismos gubernamentales vinculados a los recursos hídricos, el ambiente o las obras y servicios públicos, como p. ej. la Dirección General de Irrigación de Mendoza, la Dirección de Hidráulica de San Juan, la Secretaría de Recursos Hídricos de la Nación, la Dirección Provincial de Hidráulica de la Pcia. de Buenos Aires, la Subsecretaría de Rec. Hídricos y Medio Ambiente de Córdoba, etc. A dichos datos pueden aplicársele desde la estadística descriptiva más elemental hasta construirse modelos probabilísticos, utilizando las funciones de densidad de las distribuciones que más representen los datos muestrales disponibles (las más conocidas son Gumbel, log normal, log Pearson III y binomial)

Un método de uso generalizado, es el análisis de frecuencias para asignar a cada caudal decreciente, una probabilidad  $p$  de ser igual o mayor en un año cualquiera, incluso es más común utilizar el concepto de período de retorno  $T_r$  en vez de la probabilidad, para

definir caudales de diseño de estructuras, crecientes de proyecto, caudales disponibles, etc. El período de retorno y la probabilidad son recíprocos,  $p = 1 / Tr$ .

Existen varios modelos para analizar frecuencias, el más difundido por su sencillez, es el de Weisbull, que calcula la probabilidad de ocurrencia aplicando la ec. (1)

$$p = [ m / n + 1 ] 100 \quad (1) \quad \text{donde}$$

$p$  = probabilidad, %.

$m$  = clasificación del evento de acuerdo a su orden de magnitud.

$n$  = número de años de registro.

Consecuentemente, el período de retorno sería

$$Tr = n + 1 / m$$

El mayor evento tiene un orden  $m = 1$  y la ec (1) asigna un  $Tr$  promedio de  $n+1$  años para el evento mayor de la serie.

En la Figura 1 se observa la gráfica construida con valores de la serie histórica de caudales del Río Negro para el mes de diciembre y su probabilidad asociada. Para fines de riego, se acepta la probabilidad del 75%, por lo que es este caso, se espera que en diciembre ocurran caudales de 1.230 m<sup>3</sup>/s o inferiores. En clase se pueden trabajar los valores correspondientes al mes de enero de la misma serie.

### Serie de caudales (m<sup>3</sup>/s) del Río Negro en la Estación de Aforo Paso Roca

N° de año	Año	Diciembre	Enero
1	1948-9	1.286	745
2	1949-0	1.300	690
3	1950-1	1.249	722
4	1951-2	1.190	660
5	1952-3	1.240	715
6	1953-4	2.301	850
7	1954-5	1.269	1.385
8	1955-6	1.250	731
9	1956-7	1.245	720
10	1957-8	1.295	201
11	1958-9	1.100	710
12	1959-0	380	730
13	1960-1	1.270	700
14	1961-2	1.296	695

### Organización decreciente de la serie de $n= 14$ datos de diciembre

N° de orden	Años	Diciembre	P (%)		
1	1953-4	2.301	6,67	6,67	2.301
2	1949-0	1.300	13,33	13,33	1.300
3	1961-2	1.296	20,00	20	1.296
4	1957-8	1.295	26,67	26,67	1.295
5	1948-9	1.286	33,33	33,33	1.286
6	1960-1	1.270	40,00	40	1.270
7	1954-5	1.269	46,67	46,67	1.269
8	1955-6	1.250	53,33	53,33	1.250
9	1950-1	1.249	60,00	60	1.249
10	1956-7	1.245	66,67	66,67	1.245
11	1952-3	1.240	73,33	73,33	1.240
12	1951-2	1.190	80,00	80	1.190

13	1958-9	1.100	86,67	86,67	1.100
14	1959-0	380	93,33	93,33	380

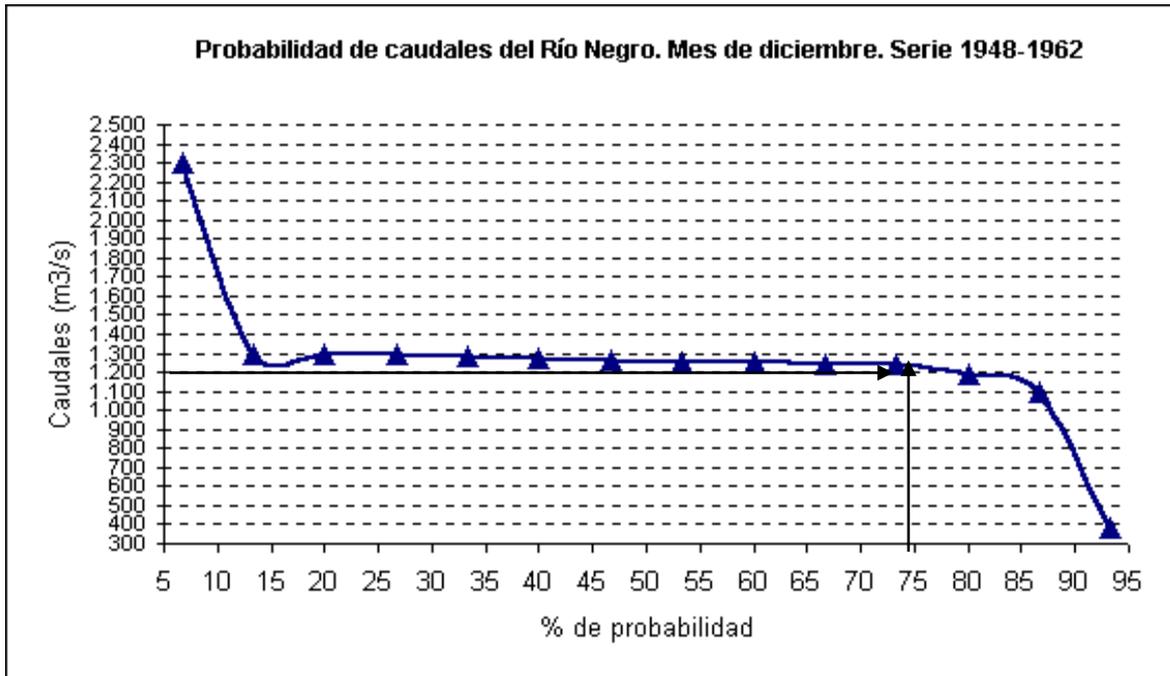


Figura 1. Probabilidades de ocurrencia de caudales.

## 6.2. Agua subterránea.

El agua de localización subterránea constituye una fuente muy importante en el país, cuya explotación para fines de riego ocurre en la mayoría de las zonas regadas, siendo a veces la única posibilidad de aprovechamiento de recursos hídricos.

Los acuíferos subterráneos son formaciones sedimentarias saturadas de agua, cuyo estudio corresponde a la rama de la geología denominada hidrogeología, que se encarga de su prospección, exploración y explotación, basado en el conocimiento de su estática y dinámica.

Los acuíferos pueden ser de distintos tipos:

- Atendiendo a su posición en el suelo y subsuelo, pueden ser subsuperficiales y profundos.

El acuífero subsuperficial se denomina acuífero freático, también capa o manto freático y es un acuífero libre. La cercanía a la superficie determina que esté bajo la influencia de la presión atmosférica. Participa activamente en los flujos verticales de entrada y salida de agua desde y hacia la atmósfera. Cuando se encuentra muy cercano a la superficie del terreno, se verifican pérdidas de agua por evapotranspiración. No es explotable como fuente de agua para riego, debido a que su escasa potencia, solo permite alumbrar caudales continuos muy pequeños, o si mayores, durante breve intervalo de tiempo, ya que su recarga es limitada.

Los acuíferos profundos son habitualmente más potentes, por lo que permiten la extracción de caudales compatibles con las necesidades de riego de los establecimientos agropecuarios y forestales, incluso a nivel zonal o regional, para abastecer grandes superficies bajo riego.

- De acuerdo con la su situación piezométrica, pueden ser libres, semiconfinados y confinados.

En todos los casos, la saturación de los espacios porosos del sedimento ocurre por la presencia de un piso o hidroapoyo, que es una franja sedimentaria que se comporta en el tiempo como “impermeable”, es decir, tiene una menor permeabilidad que el estrato superior

saturado, que es el acuífero propiamente dicho, donde se acumula transitoriamente el agua. Los acuíferos confinados tienen un techo, proporcionado por otra franja del sedimento con características similares al piso, mientras que los acuíferos semiconfinados no tienen techo y se diferencian con los acuíferos libres por su profundidad, que los aísla de la incidencia atmosférica.

La obra más común de captación de agua subterránea es el pozo o perforación, que cuando llega a los estratos acuíferos, permite la medición del nivel de agua. En el caso de la capa freática, el nivel del agua en el pozo estará equilibrado con la presión atmosférica, mientras que en los acuíferos semiconfinados y confinados, ascenderá dentro del pozo hasta equilibrarse con la presión atmosférica y generalmente al mismo nivel de la freática. El ascenso del nivel de agua en estos acuíferos está correlacionado con la presión hidrostática y se denomina nivel piezométrico. Aunque no exista un pozo, los acuíferos confinados y semiconfinados, manteniendo sus condiciones hidráulicas de agua a presión, presentan un nivel piezométrico no observable, pero real, consecuente con dicha presión hidrostática, representado por una altura o dimensión lineal, de acuerdo a  $h = P/\delta$ , donde  $h$  es la altura representativa de la presión hidrostática,  $P$  dicha presión y  $\delta$  es el peso específico del agua, tal como ocurre en una cañería presurizada, con el inconveniente que  $h$  no es medible con un manómetro, sino solamente a través de un piezómetro (pozo de pequeño diámetro, no capilar)

La presión hidrostática de estos acuíferos está dada por el ingreso en flujo horizontal de agua al acuífero, que ocurre en áreas de recarga. Las masas de agua de los acuíferos provienen de procesos de infiltración (ingreso vertical desde la superficie), de filtración (flujo vertical desde estratos superiores del sedimento) y flujo horizontal (escurrimiento subsuperficial y subterráneo) La principal fuente de agua que opera la recarga de los acuíferos son las precipitaciones y las filtraciones de cuerpos de agua artificiales y naturales (lagos, lagunas, embalses, canales de riego, áreas bajo riego)

El nivel superior de agua en un pozo sin extracción de agua, se denomina nivel estático NE, mientras que para cada caudal de alumbramiento, si se mantiene invariable, existirá un nivel inferior de agua en el pozo, denominado nivel dinámico ND, equilibrado con cada caudal de extracción. La diferencia entre los niveles estático y dinámico, se denomina depresión del pozo  $D$ , de acuerdo a  $D = NE - ND$ , todos en m o cm.

La propiedad del medio poroso referida a la capacidad de transmitir agua se expresa mediante la conductividad hidráulica  $K$ , físicamente una velocidad, que es función de las características del medio, del líquido agua y del contenido hídrico ( $\theta$ ), cuando el gradiente hidráulico o gradiente energético es unitario. El gradiente está establecido por la diferencia de presión hidrostática entre dos puntos del acuífero y la distancia entre ellos. Las dimensiones de  $K(\theta)$  de uso más frecuente son (cm/h) y (m/día), ya que generalmente las velocidades del flujo de agua subterránea es baja (en ripio, arena gruesa) a muy baja (en arenas finas y limos)

Existen varios métodos para medir la  $K$  del suelo y subsuelo, que serán tratados en detalle más adelante, con los temas referentes a Drenaje.

Nuestro interés agronómico y forestal respecto de los acuíferos, es conocer la disponibilidad de agua subterránea con fines de riego y comprender que la explotación de los mismos debe encararse sobre la base de pautas estrictamente delineadas por la Autoridad del Agua u organismos competentes, ya que toda sobreexplotación, irremediablemente conduce a la inequidad de los agroecosistemas, tanto por alterar las condiciones de accesibilidad de los usuarios (para consumo e higiene de poblaciones animales y humanas, usos industriales, etc.) como por acelerar los procesos de degradación de los recursos hídricos subterráneos.

Tal como se dijo anteriormente, estos temas deben ser trabajados por profesionales hidrogeólogos y los usuarios deben seguir las normas de explotación establecidas, aunque desgraciadamente, existen en el país pocos ejemplos de legislación que regule la captación y uso del agua subterránea y aún existiendo, el poder de policía de aguas no es ejercido eficientemente por los organismos gubernamentales. Por ello es imprescindible que el ingeniero agrónomo y forestal, en defensa del mantenimiento de la sustentabilidad de los

sistemas productivos, se sensibilice frente a las consecuencias del mal uso de los recursos hídricos.

Para conocer la existencia, características y normas de explotación de acuíferos, debe consultarse la legislación vigente y en su defecto, proponer estudios de acuíferos y de pozos a cargo de personal habilitado y especializado.

Una de las herramientas más potentes para estudiar las características de los acuíferos son los ensayos por bombeo, que conducen a dar dos tipos de respuestas:

- el conocimiento de las características hidráulicas del acuífero, independientemente del tipo de pozo y de su equipamiento (bomba, tubería, motor), aportado por ensayos o **test de acuíferos**, a partir de las mediciones de caudales y niveles piezométricos de un pozo y relacionándolos con los niveles piezométricos de una serie de pozos de observación cercanos al de bombeo, generalmente rodeándolo. Las implicancias de estos estudios son de carácter regional, permitiendo construir y validar balances hídricos.
- El conocimiento del rendimiento y depresión de un pozo de estudio, para definir la obra de un pozo de explotación y el tipo de equipamiento más adecuado para las condiciones óptimas de alumbramiento. Los alcances de estos ensayos o **test de pozo**, son locales y permiten diseñar y operar pozos de acuerdo con la oferta y demanda de agua.

### Metodología para el ensayo de pozo en acuíferos libres.

Consiste en bombear un pozo instalado en un acuífero freático, cuyo espesor o potencia sea conocida, generando distintos caudales, para lo cual es necesario contar con un motor que permita variar las r.p.m. de la bomba. Para cada caudal estabilizado, se mide el abatimiento o depresión en el pozo, que crecerá con los caudales mayores. Con la información resultante se calcula el caudal óptimo para dicha perforación, utilizando el modelo de Dupuit, asumiendo que el  $Q$  (ópt) =  $Q$  s (ópt), siendo  $s$  (ópt) = 0,66 H.

$$(H - S_i)^2 = (H^2 / Q \text{ máx}) (Q \text{ máx} - Q s_i) \quad \text{donde}$$

H = espesor o potencia del acuífero, en m.

$S_i$  = abatimiento de cada  $Q_i$ , en m.

$Q$  máx = caudal correspondiente al H máx, en  $m^3/h$

$Q s_i$  = caudal estabilizado para cada  $s_i$ , en  $m^3/h$ .

Ejemplo:

$$H = 3 \text{ m} , \quad S \text{ ópt} = 2/3 H = 2 \text{ m}$$

$$Q \text{ (m}^3\text{/h)} = 5, 7, 12, 15, 20.$$

$$S \text{ (m)} = 1; 1,5; 1,7; 2,2; 2,6.$$

$$Q \text{ máx} = 20 \text{ m}^3\text{/h}$$

$$\text{Operando } (3 \text{ m} - 2 \text{ m})^2 = 9 \text{ m}^2 / (20 \text{ m}^3\text{/h}) (20 \text{ m}^3\text{/h} - Q \text{ ópt})$$

$$1 \text{ m}^2 = 0,45 \text{ h/m} (20 \text{ m}^3\text{/h} - Q \text{ ópt})$$

$$Q \text{ ópt} = 20 \text{ m}^3\text{/h} - 2,22 \text{ m}^3\text{/h} = 17,78 \text{ m}^3\text{/h}$$

### Metodología para el ensayo de pozo en acuíferos confinados.

Para estimar el caudal óptimo a extraerse en este tipo de acuíferos, primero es necesario establecer el caudal específico del pozo  $q$  ( $m^2/h$ ), que es el caudal alumbrado por metro de abatimiento. Se obtiene aforando distintos caudales y midiendo sus abatimientos

asociados, generados durante el ensayo de bombeo. Para cada caudal se obtiene el caudal específico de acuerdo a:

$$q_i = Q_i / s_i \quad \text{donde:}$$

$q$  = caudal específico, en  $m^2/h$ .

$Q$  = caudal bombeado, en  $m^3/h$ .

$s$  = abatimiento, en m.

El  $q$  del pozo será el promedio de los  $q_i$  obtenidos  $q_{\text{pozo}} = \sum q_i / n$

El abatimiento máximo que podrá producirse en un pozo es igual a la distancia entre el nivel piezométrico estático y el techo del acuífero, por lo que el caudal óptimo será el correspondiente a la depresión óptima, de acuerdo a

$$Q_{\text{ópt.}} (m^3/h) = q (m^2/h) S_{\text{ópt}} (m)$$

En realidad, el  $Q_{\text{ópt}}$  no puede obtenerse en la práctica, por razones técnicas, ya que sobre la bomba de profundidad siempre debe mantener una carga de agua y las velocidades ascensionales en la tubería de columna de la bomba, no pueden superar valores máximos admitidos.

Ejercicio: Cota del techo del acuífero = 55 m. Cota del nivel estático del acuífero = 23,8 m  
 $s_{\text{máx.}} = 31,2$  m

$Q_1 = 1,84$   $m^3/h$        $Nd_1 = 24,35$  m       $s_1 = 0,55$  m

$Q_2 = 2,66$   $m^3/h$        $Nd_2 = 24,60$  m       $s_2 = 0,80$  m

$Q_3 = 3,27$   $m^3/h$        $Nd_3 = 24,73$  m       $s_3 = 0,93$  m

$Q_4 = 8,47$   $m^3/h$        $Nd_4 = 26,57$  m.       $s_4 = 2,77$  m

Los caudales específicos son:

$q_1 = 3,34$   $m^2/h$

$q_2 = 3,32$   $m^2/h$

$q_3 = 3,51$   $m^2/h$

$q_4 = 3,05$   $m^2/h$

$q_x = 3,305$   $m^2/h$

El caudal óptimo es  $Q_{\text{ópt}} = 3,305$   $m^2/h * 31,2$  m = 95,16  $m^3/h$

## 7. Evaluación de la calidad de agua para riego. Objetivos. Relaciones causa-efecto de la calidad del agua en el sistema agroproductivo y forestal.

La evaluación de la calidad del agua para riego debe permitir no solo la aplicación de criterios de selección lógicos (agua apta sin restricciones, con restricciones o no apta para riego) sino también aportar información relacionada con el manejo de dichas aguas en función del conjunto de variables que inciden en los procesos productivos y conservacionistas, atendiendo a la prevención de alteraciones o disturbios en los agroecosistemas, como su combate y control cuando inevitablemente ocurran, en los casos en que la presión social que determina el uso, también justifique la inversión y el gasto para mantener la sustentabilidad del medio productivo. Muchas veces el recurso hídrico disponible es de fuente única y su aprovechamiento es forzado por las necesidades socioeconómicas.

La calidad del agua es uno de los dos componentes de la caracterización de la disponibilidad de recursos hídricos y es imprescindible su conocimiento para identificar las causas que pueden generar efectos indeseables en distintos sitios del ecosistema. El pronóstico

de los efectos es un criterio utilizado en las clasificaciones de aptitud del agua con fines de riego.

Las causas más reconocidas de alteraciones de procesos biofísicoquímicos que ocurren en los sistemas rurales productivos son la salinidad, la sodicidad, la toxicidad de ciertos aniones y cationes y los efectos indeseables en las redes de elementos de conducción y aplicación de agua, como los canales, acequias, tuberías y emisores. Los efectos negativos que dichas causas originan son:

- La salinidad incrementa el potencial hídrico total de la solución del suelo al aumentar uno de sus componentes, la presión osmótica, generada por la concentración de solutos (aniones y cationes disueltos) Esta situación implica una disminución de la disponibilidad de agua del suelo por parte de las plantas, que genera una respuesta en el crecimiento y desarrollo vegetal, asociada con la ocurrencia de déficit hídrico.
- La sodicidad promueve la defloculación coloidal, dispersando agregados, alterando la estructura y la porosidad del suelo, disminuyendo la permeabilidad, disturbando las capacidades de flujos verticales y horizontales de agua en el suelo (infiltración, conductividad hidráulica).
- La toxicidad específica de determinadas concentraciones iónicas genera disturbios metabólicos que ocasiona disminuciones en la cantidad y calidad de cosechas.
- La actividad de partículas minerales y de sustancias químicas determinan alteraciones en los elementos y redes de conducción, aplicación y evacuación de aguas de riego y drenaje, como canales, acequias, drenes, desagües, emisores, tuberías y cañerías, generando distintos procesos como precipitación, entarquinamiento, erosión, sellado, obturación, corrosión.

### **7.1. Métodos de evaluación de la calidad o aptitud del agua para riego. Clasificaciones: descripción y uso.**

Aunque no sólo la naturaleza química del agua alcanza para su evaluación, constituye el aspecto más frecuentemente usado para efectuarla y a partir de ella definir clases o tipos de agua y dar recomendaciones de utilización.

Como el punto de partida para clasificar aguas para riego utilizando las distintas metodologías disponibles, es la generación de datos analíticos provistos por laboratorios especializados, dichos datos deben surgir de un correcto muestreo, fundamentalmente representativo del cuerpo de agua considerado y luego ser interpretados por profesionales de las ciencias agronómicas y forestales, que realmente estén en condiciones de evaluar las variables intervinientes de mayor peso en los procesos agroecológicos, relacionadas con el clima, el suelo, el cultivo y su tecnología, la anatomía y fisiología de las plantas, los métodos de riego y drenaje, la agroecología, la economía de los recursos naturales y de los sistemas productivos, etc.

En todos los casos, la representatividad del espacio muestral es decisivo y para atenderlo, en la medida de lo posible y de acuerdo con los objetivos de uso de la clasificación deseada, será necesario aplicar los métodos estadísticos de muestreo, a partir de una muestra preliminar que permita estimar la distribución de los indicadores de las variables a considerar, con el apoyo del conocimiento de las características de la dinámica del recurso hídrico. La principal recomendación es que las muestras de agua sean colectadas en las épocas en que se planifica su uso.

Las aguas superficiales presentan una mayor variabilidad espacial y temporal de los datos de los indicadores químicos, por lo que generalmente requieren un mayor número de muestras. Tanto el sitio como la época de extracción de muestras, deben ser representativos. Por ejemplo, las muestras de aguas de un río o arroyo deberán colectarse en las cercanías del eje de la corriente, o al menos lejos de las orillas, en tramos del cauce donde no ocurran accidentes, disturbios, aportes, derivaciones, etc.

Las aguas subterráneas tienen una mayor estabilidad química, ya que los flujos subterráneos se manifiestan lentamente, con velocidades muy bajas, pero debe por lo menos asegurarse que el pozo de alumbramiento represente las condiciones de uso, evitando coleccionar muestras de agua inmediatamente después de iniciada la extracción, ya que en ese caso, las aguas extraídas distan mucho de equilibrarse con el flujo de las masas de agua que se extraerán durante su aprovechamiento.

Las muestras de agua, químicamente siempre una solución salina, con distinto grado de mineralización, se enviarán a laboratorios especializados para obtener los siguientes valores resultantes del análisis químico, con los que se construirán los indicadores requeridos para su clasificación, que fundamentalmente aludirán al pH y a la cantidad de sales totales y de iones.

La salinidad de las muestras de agua puede obtenerse mediante los siguientes métodos:

- a) total de sólidos disueltos TSD, obtenido mediante la técnica de evaporación de la solución y pesada del residuo sólido, expresándolos en (g) o (mg) de sal
- b) concentración salina de la solución, obtenida por la técnica anterior y expresada en (g/l) o (mg/l) = (ppm).
- c) estimación de la salinidad por medición de la conductividad eléctrica CE de la solución con conductímetro o resistenciómetro, expresando la CE como la inversa de la resistencia al paso de una corriente eléctrica R (Ohm), en 1000 micromho/cm ( $\mu\text{mho/cm}$ ) = milimho/cm (mmho/cm) = deciSiemens/m (dS/m)

La concentración de los principales cationes ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ) y aniones ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{B}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ), se obtienen por distintas técnicas de laboratorio (espectrofotometría, titulación, colorimetría) y se expresarán en (me/l) = (cmol/kg).

Dichos valores pueden constituir indicadores directos o con ellos pueden construirse indicadores, siendo los más comunes la relación de adsorción de sodio RAS y el carbonato de sodio residual CSR, de acuerdo a:

$$\text{RAS} = (\text{Na}^+) / [ \frac{1}{2} (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) ]^{1/2} \text{ donde}$$

RAS = relación de adsorción de sodio Unidad (me/l) (me/l) <sup>-1/2</sup>

( $\text{Na}^+$ ), ( $\text{Ca}^{2+}$ ) y ( $\text{Mg}^{2+}$ ) = concentraciones de los cationes sodio, calcio y magnesio disueltos, en (me/l) o (cmol/kg)

$$\text{CSR} = (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-) - (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) \text{ donde}$$

CSR = carbonato de sodio residual, en me/l o cmol/kg

Concentraciones iónicas de carbonatos, bicarbonatos, calcio y magnesio, en me/l o cmol/kg.

### 7.1.1. Clasificación de Wilcox.

Wilcox (1948) clasificó las aguas en cinco clases, dando las bases de las sucesivas clasificaciones norteamericanas de aptitud agrícola de las aguas, introduciendo los conceptos de peligrosidad salina que limita la disponibilidad de agua para las plantas, evaluada mediante la CE (mili o micro mho/cm) y de peligrosidad sódica, que disminuye la permeabilidad del suelo, evaluada mediante el % de sodio.

Las divisiones entre los grupos de distintos % de Na, se calcularon en base a la ecuación del efecto de masa de Gappón (1933) asociando los % de Na solubles del agua de

riego con los % de Na intercambiable del complejo de intercambio del suelo, cuando se alcanza el equilibrio entre las soluciones y principalmente las arcillas.

Las directrices de Wilcox (1955) se presentan en la Tabla 3.

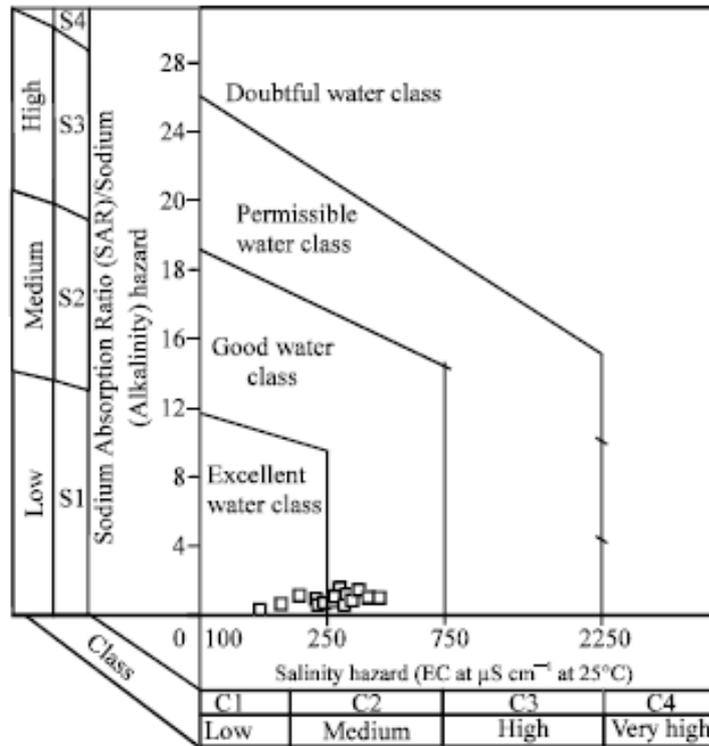


Tabla 3

### 7.1.2. Clasificación del US Salinity Lab, Riverside.

Richards y colaboradores (1954), pertenecientes al grupo de trabajo del Laboratorio de Salinidad de Norteamérica, editaron el Manual 60 del USDA denominado Diagnóstico y Rehabilitación de suelos salinos y sódicos, que incluyó la famosa clasificación de calidad de aguas para riego que aún mantiene su vigencia, debido a la enorme difusión que alcanzó en el mundo. Con la estructura de la clasificación de Wilcox, propone 4 clases de peligro de salinidad y sodicidad, ilustrada en una gráfica de doble entrada con intervalos de valores de CE y de RAS, configurando sectores delimitados por rectas (Fig.3).

Resultan cuatro clases de peligro de salinización C1 a C4 y cuatro clases de peligro de sodificación S1 a S4, con lo cual las 16 clases de agua, son las combinaciones posibles de C y S (C1S1, C1S2...C4 S1 hasta C4 S4). Para cada clase se proponían recomendaciones de uso, en base a un criterio de tolerancia salina de las plantas asociado con la reducción del 50% del rendimiento respecto del óptimo en condiciones no salinas.

Complementan los criterios clasificatorios, aspectos relacionados con la actividad dispersante del sodio en el suelo y con la toxicidad iónica específica de algunos iones, como el boro.

En el primer caso, las aguas se evalúan a través del índice CSR, considerando que valores mayores de 2,5 me/l de CSR indica que no son buenas para riego, valores entre 1,25 y 2,5 me/l indican aguas de dudosa utilización y valores de CSR menores de 1,25 me/l asegura buena aptitud del agua para riego.

Respecto de la concentración de boro, los límites permisibles para cultivos sensibles son de 1,25 ppm, para cultivos semitolerantes de 2,5 ppm y para cultivos tolerantes, 3,75 ppm.

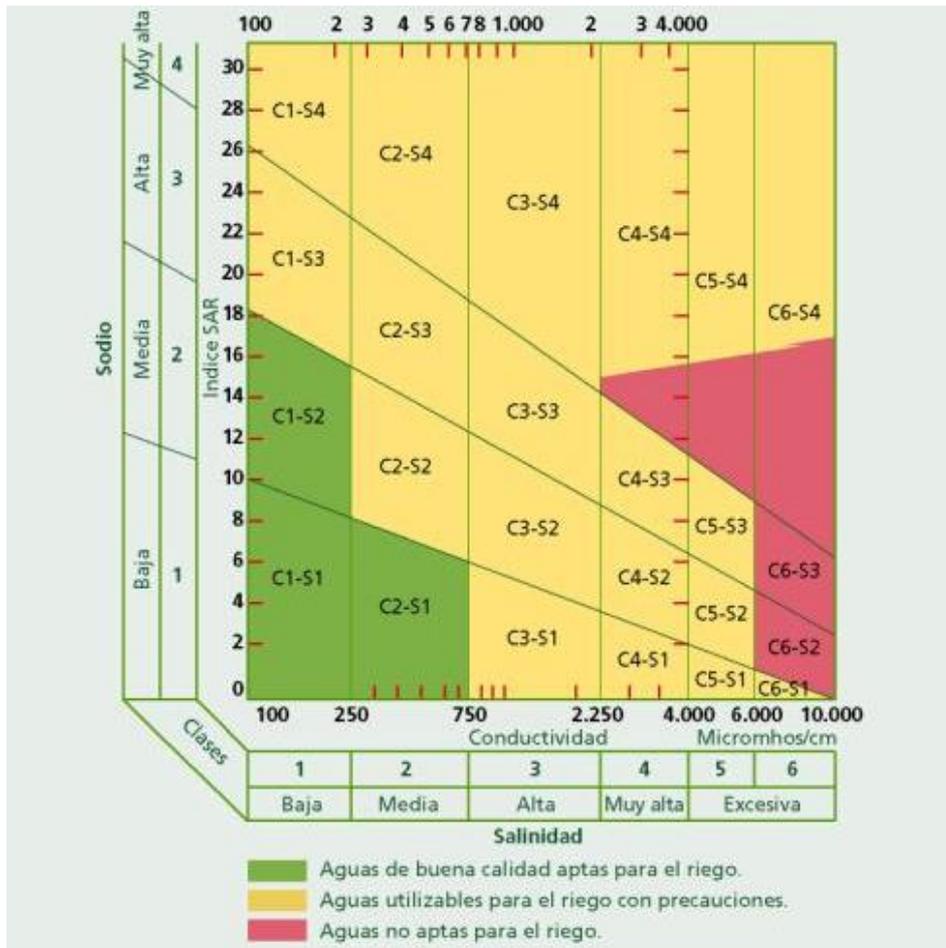


Figura 3. Diagrama para clasificar la aptitud de aguas para riego.  
 Fuente: Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos.  
 US Salinity Lab. Traducción del Handbook 60.

### 7.1.3. Clasificación del US Salinity Lab, Riverside modificada por Thorne y Petersen.

Es la versión más ampliamente difundida. Considera 6 clases de peligrosidad salina y sódica (Fig. 4). Esta clasificación ha sido concebida y por lo tanto se adapta a las zonas áridas, para suelos francos y métodos de riego superficiales con frecuencias de aplicación o intervalos de riego normales, entre 7 a 20 días. Para estas condiciones, es una herramienta muy potente para tomar decisiones preventivas y manejar sistemas bajo riego.

En zonas húmedas, con sistemas de manejo bajo riego complementario, la clasificación de la aptitud del agua pierde rigor, aunque mantiene una característica importante: la identificación del tipo de agua universalmente conocido. La validez de los pronósticos sobre los efectos indeseables de la salinidad y la sodicidad está supeditada a correcciones locales muy importantes, relacionadas principalmente con el régimen de precipitación, la cantidad, oportunidad y frecuencia de aplicación del agua de riego, su composición química y relaciones iónicas y la naturaleza de los cultivos.

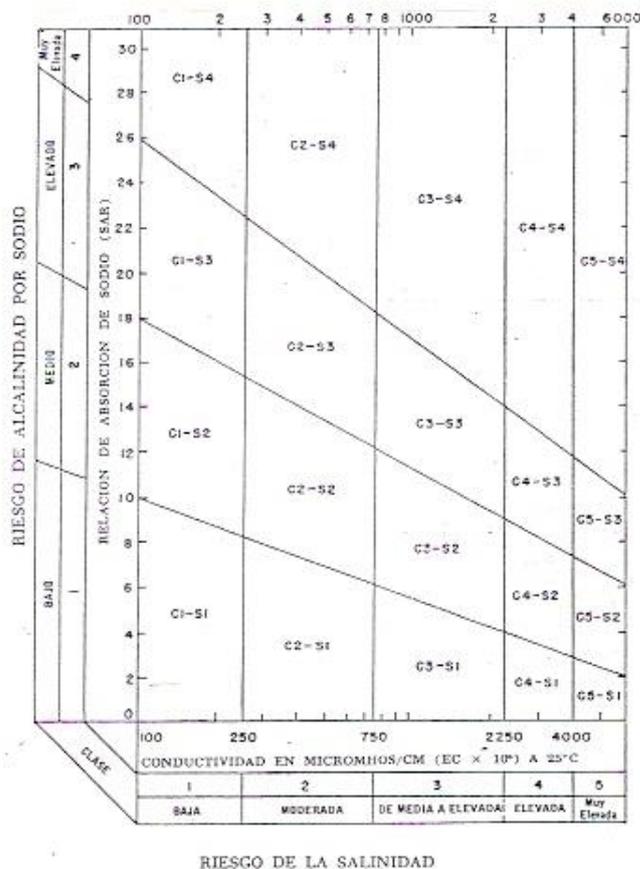


Figura 4. Modificación de Thorne y Peterson (1974)

#### 7.1.4. Clasificación de Mozheico y Vorotnik.

Es una de las muchas clasificaciones de la escuela soviética, en la cual la calidad del agua para riego es función de la salinidad, evaluada mediante la concentración y naturaleza de las sales (g/l) y de la sodicidad, evaluada mediante la relación entre cationes mono y divalentes. Las aguas pueden ser, respecto de la salinidad:

Aguas débilmente mineralizadas	Menos de 1.0 g/l de sal.
Aguas medianamente mineralizadas.	Entre 1 y 3 g/l de sal.
Aguas fuertemente mineralizadas.	Entre 3 y 5 g/l de sal.

Las aguas pueden ser, respecto de la sodicidad:

Aguas muy peligrosas, que desarrollan propiedades de suelos solonetz, cuando (Na + K) es mayor del 75% de $\Sigma$ cationes y la relación (Monovalentes / divalentes) = 4:1
Aguas relativamente peligrosas, cuando (Na + K) = 66% al 75% de la $\Sigma$ cationes y la relación (Monovalentes / Divalentes) = entre 2:1 y 4:1
Aguas no peligrosas, cuando (Na + K) es menor del 66% de la $\Sigma$ cationes y la relación (Monovalentes / Divalentes) es menor de 2:1.

#### 7.1.5. Clasificación de Aceves y Palacios Vélez (1970).

Si bien utilizan los mismos criterios de las clasificaciones del USDA, introducen un criterio modificador respecto de las clasificaciones americanas, atendiendo a la precipitación de ciertas sales cuando la solución del suelo va concentrándose, debido a la solubilidad diferencial de las sales. Sucede que sales poco solubles como sulfatos y carbonatos de calcio y magnesio, precipitan al aumentar la concentración de la solución y por lo tanto no contribuyen

a generar presión osmótica. Esta situación es importante cuando las aguas son ricas en carbonatos y bicarbonatos. El indicador que considera esta situación se denomina salinidad efectiva SE, con dimensión de me/l y se calcula de la siguiente manera:

Condición del agua	SE (me/l)
1) Si $Ca \geq (CO_3 + HCO_3 + SO_4)$	$SE = \Sigma \text{ cationes} - (CO_3 + HCO_3 + SO_4)$
2) Si $Ca \leq (CO_3 + HCO_3 + SO_4)$ pero $Ca \geq (CO_3 + HCO_3)$	$SE = \Sigma \text{ cationes} - Ca$
3) Si $Ca \leq (CO_3 + HCO_3 + SO_4)$ pero $(Ca + Mg) \geq (CO_3 + HCO_3)$	$SE = \Sigma \text{ cationes} - (CO_3 + HCO_3)$
4) Si $(Ca + Mg) \leq (CO_3 + HCO_3)$	$SE = \Sigma \text{ cationes} - (Ca + Mg)$

Todas las concentraciones expresadas en me/l. Cuando la muestra de agua presente la sumatoria de cationes inferior a la de aniones, se usará esta última.

Utilizando este indicador, la calidad del agua será:

Clase de agua	Salinidad efectiva SE (me/l)
Buena	Menor de 3
Condicionada	Entre 3 y 15
No recomendada	Mayor de 15

Los otros criterios que utilizan Aceves y Palacios, son los del USDA, por lo tanto la sodicidad la evalúan utilizando la RAS y el CSR como indicadores y la concentración de boro y cloruro como indicadores de toxicidad específica, con estas pautas:

Clase de agua	Boro (ppm)
Buena	Menor de 0,3
Condicionada	Entre 0,3 y 4
No recomendada	Mayor de 4

Clase de agua	Cloro (me/l)
Buena	Menor de 1
Condicionada	Entre 1 y 5
No recomendada	Mayor de 5

En general, las aguas serán buenas si los valores de los indicadores son inferiores a:

CE, 0,25 mmho/cm; SE, 3meq/l; SR, 1,25 meq/l; B, 0,3 ppm y Cl, 1 meq/l
--

Serán aguas de uso condicionado cuando el valor de los indicadores superen, en cada caso:

SE, 15meq/l; CSR, 2,5 meq/l; B, 4 ppm y Cl, 5 meq/l.
--

Cuando los valores de los indicadores estén comprendidos entre los extremos señalados, la calidad del agua no puede ser definida exclusivamente por sus características químicas, sino que se requiere información adicional sobre: cultivos, suelos, manejo del suelo y el cultivo, método de riego y drenaje del suelo.

#### 7.1.7. Clasificación de Ayers y Westcot (1976) Propuesta por la FAO.

La FAO publicó en 1976, una guía para evaluar la calidad de agua en la agricultura, recopilación de Ayers y Westcot (1976), que presentaba los avances en temas de salinidad, sodicidad, toxicidad, lixiviación, tolerancia de los cultivos a las sales y su respuesta productiva, difundiendo las directrices para interpretar la calidad de aguas para riego del comité de consultores reunidos por la Universidad de California en 1974.

En 1987, la FAO publicó una revisión del trabajo anterior, con las directrices que se muestran en la Figura 5. Las novedades más importantes respecto de las clasificaciones más antiguas, son:

- Salinidad: castiga menos las aguas por su tenor salino, fijando el límite para aguas de moderada restricción de uso en 3 dS/m.
- Sodicidad: vincula el riesgo de sodificación con el grado de salinización, ya que la disminución de la infiltración por dispersión coloidal favorecida por el sodio, es contrarrestada por el aumento de la permeabilidad debido a la acción de las sales en solución, que contribuyen a mantener la agregación coloidal. De esta manera, se concluye que las aguas de menor calidad son las sódicas poco salinas.
- Toxicidad: amplía las directrices para evaluar la aptitud del agua, referente a la acción específica del sodio, cloro, boro, bicarbonato y nitrato.
- Tolerancia salina de los cultivos: este es un gran aporte al conocimiento de las respuestas productivas con aguas mineralizadas, sumariando valores de rendimiento potencial de varios cultivos, que serán presentados y trabajados más adelante.

AGUA DE RIEGO: INTERPRETACIÓN DE LA CALIDAD <sup>1</sup>							
Problemas potenciales de riego				Unidad	Grado de restricción en el uso		
					Ninguno	Bajo a moderado	Severo
Salinidad ( <i>afecta la disponibilidad de agua</i> ) <sup>2</sup>							
	EC <sub>w</sub>			dS/m	< 0.7	0.7 – 3.0	> 3.0
	TDS			mg/l	< 450	450 – 2000	> 2000
Infiltración ( <i>afecta la tasa de infiltración del suelo. Evaluar usando EC<sub>w</sub> y SAR juntos</i> ) <sup>3</sup>							
SAR	= 0 – 3	y EC <sub>w</sub>	=		> 0.7	0.7 – 0.2	< 0.2
	= 3 – 6		=		> 1.2	1.2 – 0.3	< 0.3
	= 6 – 12		=		> 1.9	1.9 – 0.5	< 0.5
	= 12 – 20		=		> 2.9	2.9 – 1.3	< 1.3
	= 20 – 40		=		> 5.0	5.0 – 2.9	< 2.9
Toxicidad específica ( <i>afecta cultivos sensibles</i> )							
	Sodio (Na)						
	Riego superficial			SAR	< 3	3 – 9	> 9
	Riego por aspersión			me/l	< 3	> 3	
	Cloruro (Cl)						
	Riego superficial			me/l	< 4	4 – 10	> 10
	Riego por aspersión			me/l	< 3	> 3	
	Boro (B)			mg/l	< 0.7	0.7 – 3.0	> 3.0
Otros Efectos ( <i>afecta cultivos sensibles</i> )							
	Nitrógeno (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> - N)			mg/l	< 5	5 – 30	> 30
	Bicarbonato (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) (aspersión)			me/l	< 1.5	1.5 – 8.5	> 8.5
	pH				Rango Normal 6.5 – 8.4		

1 Adaptado de la Universidad de California Committee of Consultants 1974.

2 ECw= conductividad eléctrica del agua, en deciSiemens por metro a 25°C (dS/m) o en millimhos por centímetro (mmho/cm). TDS= total de sólidos disueltos, en miligramos por litro (mg/l).

3 SAR= relación de absorción sodio .

Se asumen las siguientes condiciones: Rendimiento potencial: con ninguna restricción de uso se asume que los cultivos alcanzan su máxima capacidad de producción. La "restricción de uso" indica que puede ser una limitante y que algún manejo especial se necesite para alcanzar la máxima producción. La "restricción de uso" no quiere decir que el agua no pueda ser utilizada. El suelo debe poseer un buen drenaje interno. Método y frecuencia de riego: Riego superficial o por aspersión. El riego no es frecuente y los cultivos utilizan 50% o más del agua almacenada en el suelo antes del próximo riego. La fracción de lavado es del 15% mínimo. No se debe utilizar esta clasificación en riego por goteo.

Figura 5. Directrices para interpretar la calidad de agua para riego. Univ. de California 1974

### **7.1.8. Calidad de aguas para riego complementario. Principios de clasificación del INTA Pergamino para aguas usadas en riego complementario de la Región Pampeana (1998).**

El riego complementario de cultivos extensivos demoró su difusión en las zonas húmedas, principalmente por desconocimiento de la tecnología de riego y porque la aptitud de las aguas subterráneas disponibles, mayoritariamente subterráneas, no resultaban aptas al clasificarse con los métodos existentes, a pesar de saberse claramente que dichas clasificaciones fueron desarrolladas en zonas áridas y por lo tanto solamente válidas para aguas de riego integral en dichas regiones.

A partir de la década del 1980, se comenzaron a producir datos de campo referentes al impacto del agua de riego en los suelos regados, que no coincidían con los pronósticos efectuados por Arens (1969) y por Lavado (1976), que desaconsejaban la utilización de las aguas disponibles en la región pampeana húmeda, por el riesgo de sodificación.

Wyckers y Génova (1987), Grenón (1988) y Génova (1989) presentaron los primeros resultados experimentales en los que se demostraba que las aguas bicarbonatadas sódicas (característica química de la amplia mayoría de los recursos hídricos subterráneos) no provocaban en el suelo ni salinización ni sodificación que descalifique el uso de dichas aguas.

Génova (1992,1993) formuló un modelo conceptual de control natural de la salinidad y sodicidad, al encontrar que la primera era controlada por el exceso de precipitación y la segunda por un conjunto de procesos (dilución y concentración de la solución del suelo, intercambio catiónico y lixiviación) favorecidos por las condiciones del medio y el manejo del riego. Con ello, quedó demostrada la inexactitud de las clasificaciones de aptitud de aguas de riego complementario en zonas húmedas.

Últimamente, Génova (2001) propuso que el modelo conceptual formulado anteriormente, se cumple a través de mecanismos de recuperación de la degradación salina y sódica de los suelos, que los mantiene sin alteraciones importantes en su productividad, explicada por la resiliencia, que es uno de los atributos de los agroecosistemas sustentables. En dichos mecanismos, intervienen factores y procesos característicos del medio en que se desarrolla el riego complementario (Clima: régimen de precipitación; Suelos: bien drenados con nivel freático lejano, alta CIC y ricos en calcio; Método de riego: láminas de riego entre 100 y 300 mm; Aguas: moderadamente salinas y sódicas) que favorecen los procesos de lixiviación, de solubilización de calcio del suelo, de intercambio catiónico y de lavado.

Dentro del marco del convenio SAGyP-INTA, el Programa IPG (1988) difundió los resultados de un Taller sobre Calidad de aguas, que produjo una clasificación preliminar de la aptitud de aguas para riego complementario de la región pampeana, que debe completarse con mayor información experimental, pero que constituye una excelente base de análisis para decidir el uso de aguas para estas condiciones de riego. En la Tabla se transcriben

parcialmente las directrices del IPG, debido a que todavía faltan evaluar los suelos vertisoles de Entre Ríos y hapludoles del sur de Santa Fé y Córdoba.

### Resumen de directrices para evaluar la calidad del agua de riego.

<b>A. RIEGO INTEGRAL EN ZONAS ARIDAS y SEMIARIDAS</b>				
<b>1. RIESGO DE SALINIDAD.</b>		Grado de restricción al uso del agua		
Método de clasificación	Indicador	Ninguno	Moderado	Severo
Wilcox (1948)	CE (mmho/cm)	<1	1y3	>3
US Salinity Lab.(Riverside 1953)	CE (mmho/cm)	<0,75	0,75 Y 2,25	> 2.25
US Salinity Lab. Riverside (Modificado por Thome y Petersen (1963)	CE (mmho/cm)	<0,75	0.75-4	>4
Mozheico y Vorotnik (1970)	Conc. de sales (g/l)	<1	1a3	3a5
Aceves y Palacios (1979)	SE (me/l)	<3	3a 15	>15
Ayers y Westcot (FAO. 1976. Actualizado en 1987)	CE (dS/m)	< 0,7	0,7a3	> 3
<b>2. RIESGO DE SODICIDAD</b>				
Wilcox (1948)	% de sodio	<60	60 a 75	>75
US Salinity Lab.(Riverside 1953)	RAS (mell)(mell)-112	<10	10 a 18	> 18
	CSR (mell)	< 1,25	1,25 a 2,5	>2,5
US Salinity Lab. Riverside (Modificado por Thome y Petersen (1963)	RAS (me/l)(mell)- 1/2CSR (me/l)	<10 < 1.25	10 a 18 1,25 a 2,5	>18 >2,5
Mozheico y Vorotnik (1970)	Cat monovalcat.div..	< 2:1	2:1 a 4:1	> 4:1
	Na+K cJr sum cation	<66%	66 a 75 %	>75%
Aceves y Palacios (1979)	CSR (me/l)	< 1,25	1,25 a 2,5	> 2,5
	RAS (me/l)(me/l)-1/2	<10	10 a 18	> 18
Ayers y Westcot (FAO, 1976. Actualizado en 1987)	RAS 00-03 Y CE =	> 0,7	0,7 a 0,2	< 0,2
	RAS 03-06 Y CE =	> 1,2	1.2 a 0,3	< 0,3
	RAS 06-12 Y CE =	> 1,9	1.9 a 0,5	< 0,5
	RAS 12-20 Y CE =	> 2,9	2,9 a 1,3	< 1,3
	RAS 20-40 Y CE=	> 5.0	5.0a2,9	<2,9
<b>3. RIESGO POR TOXICIDAD ESPECIFICA</b>				
Ayers y Westcot (FAO, 1976. Actualizado en 1987)	Boro (ppm)	<1	1a2	>2

	Na (me/l)	<3	3a9	>9
	Cloro (me/l)	<2	2a 10	>10
	Bicarbonato (me/l)	< 1,5	1,5 a 8.5	> 8,5
	Nitratos (me/l)	<5	5a30	>30

### Directrices para evaluar la calidad de las aguas de riego.

<b>B. RIESGO DE OBSTRUCCION DE TUBERIAS y EMISORES EN SISTEMAS</b>				
DE RIEGO LOCALIZADO.		(Fuente: Takayama y Bucks, 1986)		
Inconvenientes	Indicador	Probabilidad de obstrucción		
a) Problemas de tipo físico:		Baja	Media	Alta
Materiales en suspensión	Concentrac. (mgll)	<50	50 -100	> 100
b) Problemas de tipo químico:				
Alcalinidad (bicarbonato de sodio)	Concentrac.(mg/l)	< 100	100 a 200	>200
Calcio	Concentrac. (mgll)	< 10	10 a 50	>50
Hierro	Concentrac.(mg/l)	< 0,1	0,1 a 1,5	> 1,5
Manganeso	Concentrac.(mg/l)	< 0,1	0,1 a 1,5	> 1,5
pH	pH escala 1-14	< 7	7a8	>8
Sulfuro	Concentrac.(mg/l)	< 0,5	0,5a2.0	>2.0
Total de sólidos disueltos	Concentrac.(mg/l)	<500	500 a 2.000	> 2.000
c) Problemas de tipo biológico:				
Bacterias	Número por mi	< 10.000	10.000 Y50.000	> 50.000

### C. RIESGO DE SALINIDAD y SODICIDAD EN RIEGO COMPLEMENTARIO.

Válido para la región pampeana húmeda. Fuente: IPG-Taller sobre calidad de agua, 1998.

1) Riesgo de salinidad	Indicador	Aptitud del agua de riego		
		Buena	Dudosa	No recomendada
Zonas donde el excedente otoñal de lluvias produzca el lavado de sales, en suelos con nivel freático < - 3 m	CE (dS/m)	Menor de 2	2y4	Mayor de 4
2) Riesgo de sodicidad				
a) Suelos del sudeste bonaerense MO superficial 6-7%, % arcilla 25-26 CIC 22-25 cmollkg, pH 6-7 Req.de riego 70-160 mmlaño	RAS	<15	15 a 20	>20
b) Argiudoles del norte de Bs. As. MO= 2,5-3%, % arc horiz A=22-24% Req. de riego,150-200 mmlaño	RAS	< 10	10 a 15	>15
c) Argiudoles del NE de Santa Fé Arc. Horiz A=26%, limo= 70 % CIC= 20 cmollkg, pH ligeram. Ácido Req. De riego 150-300 mm/año	RAS	<7	7 a 12	>12
d) Haplustoles del centro sur de Córdoba, francolimosos en superficie CIC= 15-17 cmollkg y req. de riego200-350 mm/año.-	RAS	<5	5a 10	>10

### 7.3. Tolerancia salina de los cultivos.

Casi todos los cultivos son altamente sensibles a la concentración salina de la solución del suelo en la germinación y en los primeros estadios vegetativos (plántula). En estado adulto, las especies vegetales presentan distintas respuestas a la salinidad, asociadas a su morfología y fisiología. El grupo de trabajo del US Salinity Lab. de Riverside (1953) produjo un listado de cultivos con tolerancias salinas relacionadas con el 50% de disminución de los rindes.

Ayers y Westcot (1987) a partir de los trabajos y recopilaciones de Maas y Hoffman (1977) y de Maas (1984), presentaron valores de tolerancia salina de varios grupos de cultivos (extensivos, hortalizas, frutales y forrajeros), utilizando el criterio de rendimiento potencial o relativo, expresado en el siguiente modelo:

$$RR = 100 (CE_0 - CE_e) (CE_0 - CE_{100})^{-1} \quad (1) \quad \text{donde}$$

RR = rendimiento relativo, en %.

CE<sub>0</sub> = salinidad que determina RR = 0, o sea la máxima reducción de rendimientos

CE<sub>e</sub> = salinidad del extracto de saturación del suelo en equilibrio con el agua de riego.

CE<sub>100</sub> = salinidad que determina RR = 100%, o sea ninguna reducción de rindes.

Los valores de CE (dS/m) para cada cultivo, asociados a RR de 0, 10, 25, 50 y 100%, correspondientes a reducciones de rendimientos por salinidad respecto de los rendimientos normales de 100, 90, 75, 50 y 0 %, respectivamente.

Con la información proveída en la Tabla, pueden construirse ecuaciones de las rectas, para luego obtener cualquier valor no tabulado, e interpretar las relaciones entre salinidad y rendimientos. A continuación se ejemplifica con el cultivo de papa, cuyo modelo se construyó con los siguientes valores:

Rendimiento relativo RR	100	90	75	50	0
Reducción de rendimientos	0	10	25	50	100
CE <sub>e</sub> (dS/m)	1,7	2,5	3,8	5,9	10,0

Interpretando los valores de la Tabla, puede concluirse que la papa tolera hasta CE<sub>e</sub> = 1,7 dS/m en la solución del suelo sin disminuir su rendimiento y que el agua de riego puede contener hasta CE<sub>a</sub> = 1,1 dS/m. También que para lograr el 50% del rendimiento normal de papas, en condiciones no salinas o hasta con salinidad de CE<sub>e</sub> = 1,7 dS/m, pueden usarse aguas de riego con CE<sub>a</sub> = 3,9 dS/m, que generarían una CE<sub>e</sub> = 5,9 dS/m.

Para valores no tabulados, podrá calcularse, con la ecuación, el RR esperable cuando CE<sub>e</sub> = 3 dS/m. Así:  $RR = 100 (10 - 3) (10 - 1,7)^{-1} = 84,3 \%$  que significa una reducción de rendimientos del 15,7%. También, construida la ec. de la recta de la papa, que resulta  $RR_{papa} = 120,48 - 12,05 CE_e$  (2), se obtendría para CE<sub>e</sub> = 3 dS/m un RR = 84,3%. Por último, podría pronosticarse el valor de CE<sub>e</sub> que permitiría obtener un RR = 80%, o sea una reducción de rindes del 20%.

Si  $RR \% = 120,48 - 12,05 CE_e$ , reemplazando queda  $80 = 120,48 - 12,05 CE_e$  y operando, se obtiene CE<sub>e</sub> = 3,3 dS/m.

#### TOLERANCIA A LA SALINIDAD DE CULTIVOS SELECCIONADOS EN RELACIÓN CON SU RENDIMIENTO POTENCIAL Y SALINIDAD DEL AGUA DE RIEGO (EC<sub>a</sub>) (FAO)

Cultivos extensivos	Rendimiento Potencial									
	100%		90%		75%		50%		0%	
	EC <sub>x</sub>	EC <sub>a</sub>	EC <sub>x</sub>	EC <sub>a</sub>	EC <sub>x</sub>	EC <sub>a</sub>	EC <sub>x</sub>	EC <sub>a</sub>	EC <sub>x</sub>	EC <sub>a</sub>
Cebada ( <i>Hordeum vulgare</i> )	8,0	5,3	10	6,7	13	8,7	18	12	28	19
Algodón ( <i>Gossipium</i> )	7,7	5,1	9,6	5,4	13	8,4	17	12	27	18

hirsutum)										
Remolacha azucarera (Beta vulgaris)	7,0	4,7	8,7	5,8	11	7,5	15	10	24	16
Sorgo (Sorghum bicolor)	6,8	4,5	7,4	5,0	8,4	5,6	9,9	6,7	13	8,7
Trigo (Triticum aestivum)	6,0	4,0	7,4	4,9	9,5	6,3	13	8,7	20	13
Trigo duro (Triticum turgidum)	5,7	3,8	7,6	5,0	10	6,9	15	10	24	16
Soja (Glycine max)	5,0	3,3	5,5	3,7	6,3	4,2	7,5	5,0	10	6,7
Caupíes (Vigna unguiculata)	4,9	3,3	5,7	3,8	7,0	4,7	9,1	6,0	13	8,8
Maní (Arachis hypogaea)	3,2	2,1	3,5	2,4	4,1	2,7	4,9	3,3	6,6	4,4
Arroz (Oryza sativa)	3,3	2,0	3,8	2,6	5,1	3,4	7,2	4,8	11	7,6
Caña azúcar Saccharum officinarum)	1,7	1,1	3,4	2,3	5,9	4,0	10	6,8	19	17
Maíz (Zea mays)	1,7	1,1	2,5	1,7	3,8	2,5	5,9	3,9	10	6,2
Lino (Linum unitatissimum)	1,7	1,1	2,5	1,7	3,8	2,5	5,9	3,9	10	6,7
Frijoles (Phaseolus vulgaris)	1,0	0,7	1,5	1,0	2,3	1,5	3,6	2,4	6,3	4,2
<b>Hortalizas</b>										
Calabaza, zapallito italiano (Cucurbita pepo melopepo)	4,1	3,1	5,8	3,8	7,4	4,9	10	6,7	15	10
Remolacha azucarera (Beta vulgaris)	4,0	2,7	5,1	3,4	6,8	4,5	9,6	6,4	15	10
Calabaza, zapallo (Cucurbita pepo melopepo)	3,2	2,1	3,8	2,6	4,8	3,2	6,3	4,2	9,4	6,3
Brócoli (Brassica oleracea botrytis)	2,8	1,9	3,9	2,6	5,5	3,7	8,2	5,5	14	9,1
Tomate (Lycopersicon esculentum)	2,5	1,7	3,5	2,3	5,0	3,4	7,6	5,0	13	8,4
Pepino (Cucumis sativus)	2,5	1,7	3,3	2,2	4,4	2,9	6,3	4,2	10	6,8
Espinaca (Spinacia oleracea)	2,0	1,3	3,3	2,2	5,3	3,5	8,6	5,7	15	10
Apio (Apium graveolens)	1,8	1,2	3,4	2,3	5,8	3,9	9,9	6,6	18	12
Col (Brassica oleracea capitata)	1,8	1,2	2,8	1,9	4,4	2,9	7,0	4,6	12	8,1
Papas, patatas (Solanum tuberosum)	1,7	1,1	2,5	1,7	3,8	2,5	5,9	3,9	10	6,7
Maíz dulce (Zea mays)	1,7	1,1	2,5	1,7	3,8	2,5	5,9	3,9	10	6,7
Camote, batatas (Ipomoea batatas)	1,5	1,0	2,4	1,6	3,8	2,5	6,0	4,0	11	7,1
Pimiento, ají (Capsicum annum)	1,5	1,0	2,2	1,5	3,3	2,2	5,1	3,4	8,6	5,8
Lechuga (Lactuca sativa)	1,3	0,9	2,1	1,4	3,2	2,1	5,1	3,4	9,0	6,0
Rábano (Raphanus sativus)	1,2	0,8	2,0	1,3	3,1	2,1	5,0	3,4	8,9	5,9
Cebolla (Allium cepa)	1,2	0,8	1,8	1,2	2,8	1,8	4,3	2,9	7,4	5,0
Zanahoria (Daucus carota)	1,0	0,7	1,7	1,1	2,8	1,9	4,6	3,0	8,1	5,4
Frijoles (Phaseolus vulgaris)	1,0	0,7	1,5	1,0	2,3	1,5	3,6	2,4	6,3	4,2
Nabo (Brassica rapa)	0,9	0,6	2,0	1,3	3,7	2,5	6,5	4,3	12	8,0
<b>Cultivos Forrajeros</b>										

Agropiro (Agropiron elongatum)	7,5	5,0	9,9	6,6	13	9,0	19	13	31	21
Agropiro crestado (Agropiron cristatum)	7,5	5,0	9,0	6,0	11	7,4	15	9,8	22	15
Pasto de Bermuda (Cynodon dactylon)	6,9	4,6	8,5	5,6	11	7,2	15	9,8	23	15
Cebada forrajera (Hordeum vulgare)	6,0	4,0	7,4	4,9	9,5	6,4	13	8,7	20	13
Ballico (Lolium perenne)	5,6	3,7	6,9	4,6	8,9	5,9	12	8,1	19	13
Loto, pata de pájaro (Lótus corniculatus tenuifolium)	5,0	3,3	6,0	4,0	7,5	5,0	10	6,7	15	10
Falaris bulbosa, alpiste bulboso (Phalaris tuberosa)	4,6	3,1	5,9	3,9	7,9	5,3	11	7,4	18	12
Festuca alta (Festuca elatior)	3,9	2,6	5,5	3,6	7,8	5,2	12	7,8	20	13
Agropiro (Agropyron sibiricum)	1,5	2,9	6,0	4,0	9,8	6,5	16	11	28	19
Veza de hoja estrecha, Alverjilla (Vicia angustifolia)	3,0	2,0	3,9	2,6	5,3	3,5	7,6	5,0	12	8,1
Sorgo de Sudán (Sorghum sudanense)	2,8	1,9	5,1	3,4	8,6	5,7	14	9,6	26	17
Elino (Elinus triticoides)	2,7	1,8	4,4	2,9	6,9	4,6	11	7,4	19	13
Caupí (Vigna unguiculata)	2,5	1,7	3,4	2,3	4,8	3,2	7,1	4,8	12	7,8
Loto de los pantanos (Lotus uliginosus)	2,3	1,5	2,8	1,9	3,6	2,4	4,9	3,3	7,6	5,0
Sesbania, cáñamo (Sesbania exaltata)	2,3	1,5	3,7	2,5	5,9	3,9	9,4	6,3	17	11
Esfaerofisa (Sphaerophysa salsula)	2,2	1,5	3,6	2,4	5,8	3,8	9,3	6,2	16	11
Alfalfa (Medicago sativa)	2,0	1,3	3,4	2,2	5,4	3,6	8,8	5,9	16	10
Eragrostis (Eragrostis sp.)	9,0	1,3	3,2	2,1	5,0	3,3	8,0	5,3	14	9,3
Maíz forrajero (Zea mays)	1,8	1,2	3,2	2,1	5,2	3,5	8,6	5,7	15	10
Trébol de Alejandría	1,5	1,0	3,2	2,2	5,9	3,9	10	6,8	19	13
Dactilo ramoso (Dactylis glomerata)	1,5	1,0	3,1	2,1	5,5	3,7	9,6	6,4	18	12
Cola de zorra (Alopecurus pratensis)	1,5	1,0	2,5	1,7	4,1	2,7	6,7	4,5	12	7,9
Trébol rojo (Trifolium pratense)	1,5	1,0	2,3	1,6	3,6	2,4	5,7	3,8	9,8	6,6
Trébol híbrido (Trifolium hybridum)	1,5	1,0	2,3	1,6	3,6	2,4	5,7	3,8	9,8	6,6
Trébol blanco (Trifolium repens)	1,5	1,0	2,3	1,6	3,6	2,4	5,7	3,8	9,8	6,6
Trébol fresa (Trifolium fragiferum)	1,5	1,0	2,3	1,6	3,6	2,4	5,7	3,8	9,8	6,6
Cultivos Frutales										
Almendra (Prunus dulcis)	1,5	1,0	2,0	1,4	2,8	1,9	4,1	2,8	6,8	4,5
Ciruelo (Prunus domestica)	1,5	1,0	2,1	1,4	2,9	1,9	4,3	2,9	7,1	4,7
Zarzamora (Rubus sp.)	1,5	1,0	2,0	1,3	2,6	1,8	3,8	2,5	6,0	4,0
Fresa (Fragaria sp.)	1,0	0,7	1,3	0,9	1,8	1,2	2,5	1,7	4,0	2,7

Palma datilera (Phoenix dactylifera)	4,0	2,7	6,8	4,5	11	7,3	18	12	32	21
Pomelo, toronja (Citrus sinensis)	1,7	1,1	2,4	1,6	3,3	2,2	4,8	3,2	8,0	5,3
Melocotenero (Prunus pérsica)	1,7	1,1	2,2	1,5	2,9	1,9	4,1	2,7	6,5	4,3
Albaricoquero (Prunus armeniaca)	1,6	1,1	2,0	1,3	2,6	1,8	3,7	2,5	5,8	3,8
Vid (Vitis sp.)	1,5	1,0	2,5	2,7	4,1	2,7	6,7	4,5	12	7,9

1 Fuente: Mass y Roffman (1977) Y de Mass (1984). Los valores deben tomarse únicamente como guía de tolerancia relativa entre los grupos de cultivos. Los valores de tolerancia absoluta varían con el clima, condiciones de suelo y prácticas de cultivo. En los suelos con yeso natural, las plantas pueden tolerar aproximadamente 2,0 dS/m de salinidad en el suelo (ECx), por encima de los valores dados. La salinidad del agua (ECa), sin embargo, permanece igual a la mostrada en la tabla.

2 La ECx, es la salinidad promedio del agua del suelo contenida en la zona radicular, representada por la conductividad eléctrica del extracto de saturación de su suelo, expresada en decisiémenes por metro (dS/m) a 25°C. La ECa, es la conductividad eléctrica del agua de riego, expresada también en dS/m a 25°C. La relación entre la salinidad del agua y del suelo (ECx = 1,5 ECa), supone una fracción de lixiviación entre 0,15 y 0,20 y un patrón de extracción de agua normal. Lo mismo se ha supuesto en las directrices de la Tabla 1.

#### 7.4. Requerimiento de lixiviación. Concepto, estimación y aplicaciones.

Para contrarrestar las consecuencias catastróficas que la acumulación de sales provoca en el perfil de los suelos regados, se puede aplicar un exceso de agua que disuelva y profundice las sales que se introdujeron con el agua de riego. Este excedente se denomina requerimiento de lixiviación, que al satisfacerse, mantiene en equilibrio salino del suelo.

#### ECUACION DEL BALANCE SALINO EN LA RIZOSFERA

$$V_r C_r + V_{pp} C_{pp} + V_{as} C_{as} + S_m + S_f - V_d C_d - S_p - S_c = 0 \quad (1)$$

V<sub>r</sub>, V<sub>pp</sub>, V<sub>as</sub> y V<sub>d</sub>: volúmenes de agua de riego, lluvia, subterránea y drenada, respectivamente.

C<sub>r</sub>, C<sub>pp</sub>, C<sub>as</sub> y C<sub>d</sub>: concentraciones de las diferentes aguas.

S<sub>m</sub>: cantidad de sales disueltas de los minerales del suelo.

S<sub>f</sub>: aportadas por fertilizantes y enmiendas.

S<sub>p</sub>: precipitadas que salen de la solución.

S<sub>c</sub>: removidas por extracción en la cosecha.

#### ECUACION SIMPLIFICADA DEL BALANCE SALINO

$$V_r C_r = V_d C_d \quad (2)$$

$$RL = V_d/V_r = C_r/C_d = C_{Er}/C_{Ed} = Req. lixi \quad (3)$$

Para calcular el volumen de riego o lámina de riego de una temporada, de un riego inicial o de cada riego, se opera así:

$$RL = V_d/V_r = dd/dr \text{ donde } d \text{ son láminas.} \quad (4)$$

Como dd = dr - Et, reemplazando en (4) se tiene:

$$RL = (dr - Et) / dr$$

$$RL = 1 - Et/dr \quad (5)$$

y puede calcularse la lámina de riego, conociendo la fracción de lixiviación y el consumo evapotranspirativo, de la forma:

$$dr = Et / (1-RL) \quad (6)$$

#### CALCULO DEL REQUERIMIENTO DE LIXIVIACION.

Rhoades, citado por Ayers y Westcot propuso nuevas ecuaciones para calcular el RL en función de frecuencia de riego y de la tolerancia salina de las plantas asociadas a rendimientos relativos o disminución de rendimientos.

a) Para métodos de riego de superficie y aspersión con frecuencia normal.

$$RL = 100 C_{Er} / 5 C_{Ee} - C_{Er} \quad (8) \text{ donde}$$

$C_{Er}$  = CE agua de riego

$C_{Ee}$  = CE tolerancia del cultivo asociada a un nivel de disminución de rendimiento. Tabla de FAO ó gráficas de Maas y Hoan.

b) Para métodos de goteo y aspersión diaria.

$$RL = C_{Er} / 2 C_{Ee \text{ máx}} \quad (9) \text{ donde}$$

$C_{Ee \text{ máx}}$  = el la  $C_{Ee}$  asociada a la máxima reducción de rendimientos, o sea rendimiento relativo  $RR = 0$

Para calcular el RL se usa la información de la salinidad del agua de riego  $C_{Ea}$  en dS/m y los valores de tolerancia  $C_{Ee}$  de la Tabla 5. El intervalo y el método de riego establecen la frecuencia de riego, con la que se selecciona el modelo de cálculo del RL.

Ejemplos: El RL para regar por surcos con agua de  $C_{Ea} = 2$  dS/m un cultivo de pomelos sin que se reduzca el rendimiento sería  $RL = 100 * 2 / (5 * 1,8 - 2) = 28,5 \%$ , mientras que regando por goteo sería  $RL = 100 * 2 / 2 * 8 = 12,5 \%$ . Si regando por surcos se permite reducir el rinde un 10 %, el RL será  $100 * 2 / (5 * 2,4) - 2 = 20 \%$  y si se permite reducir un 50% el rendimiento, el RL disminuiría a  $100 * 2 / (5 * 4,9) - 2 = 8,9\%$

De acuerdo a los modelos propuestos para calcular los RL, las tendencias son las siguientes: cuanto más salinas sean las aguas de riego, se requerirán RL mayores. Para una misma agua, cultivos más tolerantes requerirán menores valores de RL y el RL también disminuirá a medida que se permitan crecientes reducciones de los rendimientos.

Un ejemplo de aplicación del RL para calcular la lámina de riego que se entregará para mantener el balance salino del suelo es el siguiente: Para el riego por surcos de los pomelos, se calculó una lámina de 20 mm de agua de  $C_{Ea} = 2$  dS/m, por lo que considerando el  $RL = 28,5\%$ , la lámina incrementada por el RL será de  $20 \text{ mm} / (1 - 0,285) = 28 \text{ mm}$ . Si el riego fuese por goteo, el  $RL = 12,5\%$ , la lámina a reponer sería de  $20 \text{ mm} / (1 - 0,125) = 23 \text{ mm}$ .

#### 7.5. Eficiencias de conducción y aplicación de agua en los sistemas regados.

La eficiencia en la conducción de agua en canales y acequias se evalúa aforando los caudales que pasan en determinados puntos de la conducción, separados por el intervalo de distancia que se desee considerar. Los dispositivos de aforo serán los convencionales adaptados a cada situación, siendo lo más representativo entre dos tramos, realizar el aforo con el mismo sistema, instrumental y, de ser posible, persona que realice el aforo. Para cada tramo evaluado se evaluará la eficiencia en la conducción lograda, relacionando los dos valores de caudales, aguas arriba y abajo, mediante el siguiente modelo:

$Ef_c = 100 Q_2 / Q_1 \quad (1) \quad \text{donde:}$
--

$Ef_c$  = eficiencia de conducción, en %.

$Q_1$  = caudal de la estación 1, aguas arriba, en  $m^3/s$ ,  $Q_2$  = caudal de la estación 2, aguas debajo de la estación 1, en  $m^3/s$ . Por ejemplo,  $Q_1 = 1,12 m^3/s$ ,  $Q_2 = 0,98 m^3/s$ ,  $Ef_c = 87,5 \%$

La eficiencia de aplicación  $Ef_a$  es la relación entre la cantidad de agua que se aplica al suelo en el riego y la que efectivamente queda retenida en la zona de raíces del cultivo regado. La  $Ef_a$  debe evaluarse a campo, obteniendo los valores de humedad edáfica antes y después de realizado el riego, respetando los horizontes o estratos de suelo y seleccionando varios sitios de la unidad de riego. En el caso de surcos, el número de sitios a evaluar (toma de muestras de suelo de cada horizonte) será una función de la longitud del surco, siempre considerando por lo menos tres ambientes (cabecera, medio y pie del surco), con por lo menos tres a cuatro repeticiones, para que cada dato sea un promedio de dichas repeticiones y tenga valor estadístico. En el caso de amelgas, debido a la mayor superficie de distribución de la lámina aplicada, el número de los sitios muestrales debe ser importante, que represente toda el área. El primer modelo de cálculo de la  $Ef_a$  considera el promedio de todos los valores hallados, y es:

$$Ef_a = 100 \Sigma d\bar{a}_i / dd \quad (2) \quad \text{donde:}$$

$\Sigma d\bar{a}_i$  = sumatoria de láminas medias almacenadas por horizonte o estrato, en toda la zona de raíces, en mm y  $dd$  = lámina derivada, en mm. La  $dd$  se calcula tomando caudal, tiempo y superficie regados.

Cada  $d\bar{a}_i$  se obtiene de la diferencia de láminas obtenidas del muestreo de suelos, de cada horizonte o estrato, antes y después de efectuado el riego. El intervalo de tiempo desde inmediatamente finalizado el riego para realizar el muestreo, es función de la textura, ya que es necesario esperar que se distribuya la humedad en toda la zona de raíces. Se puede utilizar, orientativamente, los siguientes intervalos: 24 hs después del riego en suelos arenosos, 48 hs para los francos y 72 hs para los arcillosos.

Otro modelo utilizado para evaluar la  $Ef_a$  es la  $Ef_{aci}$ , denominada eficiencia de aplicación del cuarto inferior, donde el promedio de láminas almacenadas en la zona de raíces solamente considera el 25% de todos los datos, solamente los menores. De esta forma se evalúa una eficiencia más sesgada, ponderada, ya que solo toma la cuarta parte de los valores obtenidos, que corresponden a los más pequeños.

$$Ef_{aci} = 100 \Sigma d\bar{a}_{ci} / dd \quad (3) \quad \text{donde}$$

$Ef_{aci}$  = eficiencia de aplicación del cuarto inferior, en %.

$\Sigma d\bar{a}_{ci}$  = promedio del 25% de las menores láminas almacenadas en la zona de raíces, en mm

## 8. Demanda hídrica. Métodos de caracterización. Curvas de demanda.

Objetivos:

- Establecer la demanda hídrica de un territorio, en base al diagnóstico de uso del suelo, superficies, requerimientos hídricos de los cultivos y pérdidas en la conducción y aplicación de agua.

Usos :

- Comparación de la oferta y demanda hídricas, para el ajuste de áreas y caudales.
- Determinación de turnos de entrega de agua a los usuarios.
- Definición de la capacidad necesaria para la construcción de la red de canales .

#### Procedimiento:

- Identificar la cédula de cultivos, en base a encuestas e información antecedente (registros y cartografía).
- Establecer el cronograma de cultivos durante un período (ciclo agrícola, ciclo hidrológico, ciclo económico, etc.)
- Confeccionar el balance de superficies mensual de uso del suelo.
- Estimar la Eto y la Etc de cada cultivo.
- Generar el requerimiento hídrico mensual durante el ciclo.
- Definir las pérdidas de agua en la conducción y aplicación. Incluir el requerimiento de lixiviación si es necesario.
- Estimar la precipitación efectiva mensual.
- Definir las necesidades mensuales de riego.  $Nr = Et - Pe$
- Estimar la demanda hídrica mensual volumétrica  $DH = Nr / \text{eficiencias} = (m^3)$
- Calcular el caudal continuo mensual.  $Qc = DH / \text{tiempo} = (l / s)$
- Calcular la dotación de riego  $Dot = Qc / \text{área} = (l / s.ha)$
- Graficar las tres curvas de demanda (Vol, Qc y Dot).

#### Datos para desarrollar un ejemplo de cálculo y construcción de curvas de demanda:

Valle del Río Blanco, San Juan. Sup. total: 20.000 ha de cultivos anuales y perennes. Cédula de cultivos: 5.000 ha de vid, 3.000 ha de álamos, 2.000 ha de alfalfa, 1.500 ha de tomate, 1.000 ha de cebolla. Total de superficie regada : 12.500 ha. Datos climáticos hidrológicos:

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Pp (mm/mes)	20	15	30	10	5	5	15	20	25	25
Eto (mm/d)	10	8	6	4	3	4	6	8	9	11

Temporada, método y eficiencia de aplicación de agua:

Vid. 9 meses, agosto a abril. Melgas, 60%. Alamo: 10 meses, agosto a mayo. Surcos, 50 %

Alfalfa: 10 meses, agosto a mayo. Aspersión, 80% Tomate: 7 meses, octubre a abril. Goteo, 90%. Cebolla: 10 meses, marzo a diciembre. Surcos corrugados, 55 %

Eficiencia de conducción de la red de canales y acequias: 75 %

A continuación se muestran las hojas de cálculo y las curvas de demanda, elaboradas con el Programa Excel, quedando construido un sencillo programa de cómputo.

#### EJERCICIO DE CALCULO DE CURVAS DE DEMANDA.

Cédula de cultivos

Cultivo	Hectáreas	Método Riego	Ef. Apl. (%)	Meses ciclo	Ciclo	Efic. Conduc	Efic. Total
Vid	5.000	Melgas	60	9	Ago-abril	75	0,45
Álamos	3.000	Surcos	50	10	Ago-mayo	75	0,375
Alfalfa	2.000	Aspersión	80	10	Ago-mayo	75	0,6
Tomate	1.500	Goteo	90	7	Oct-abril	75	0,675
Cebolla	1.000	Corrugac.	55	10	Mar-dic	75	0,4125
Total	12.500						

Cronograma de uso del suelo y balance de superficies(ha)

	Vid	Álamo	Alfalfa	Tomate	Cebolla	Totales
Ene	5.000	3.000	2.000	1.500	0	11.500
Feb	5.000	3.000	2.000	1.500	0	11.500
Mar	5.000	3.000	2.000	1.500	1.000	12.500
Abr	5.000	3.000	2.000	1.500	1.000	12.500
May	0	3.000	2.000	0	1.000	6.000
Jun	0	0	0	0	1.000	1.000
Jul	0	0	0	0	1.000	1.000
Ago	5.000	3.000	2.000	0	1.000	11.000
Set	5.000	3.000	2.000	0	1.000	11.000
Oct	5.000	3.000	2.000	1.500	1.000	12.500
Nov	5.000	3.000	2.000	1.500	1.000	12.500
Dic	5.000	3.000	2.000	1.500	1.000	12.500

Cuadro intermedio Factor = (superficie (ha) \* 10 mm/ha ) / efic apli \* efic conduc /10000

	Vid	Álamo	Alfalfa	Tomate	Cebolla
Ene	111.111	80.000	33.333	22.222	24.242
Feb	111.111	80.000	33.333	22.222	24.242
Mar	111.111	80.000	33.333	22.222	24.242
Abr	111.111	80.000	33.333	22.222	24.242
May	111.111	80.000	33.333	22.222	24.242
Jun	111.111	80.000	33.333	22.222	24.242
Jul	111.111	80.000	33.333	22.222	24.242
Ago	111.111	80.000	33.333	22.222	24.242
Set	111.111	80.000	33.333	22.222	24.242
Oct	111.111	80.000	33.333	22.222	24.242
Nov	111.111	80.000	33.333	22.222	24.242
Dic	111.111	80.000	33.333	22.222	24.242

	Coficiente de cultivo kC	Eto (mm/d)	Eto (mm/mes)				
	Vid	Álamo	Alfalfa	Tomate	Cebolla		
Ene	1	0,8	1,2	0,9	0	10	310
Feb	0,8	0,7	1,1	0,85	0	8	224
Mar	0,6	0,6	0,9	0,8	0,4	6	186
Abr	0,5	0,5	0,8	0,6	0,5	4	120
May	0	0,4	0,6	0	0,55	3	93
Jun	0	0	0	0	0,6	3	90
Jul	0	0	0	0	0,6	3	93
Ago	0,6	0,6	0,7	0	0,7	4	124
Set	0,8	0,65	0,85	0	0,8	6	180
Oct	0,9	0,7	0,95	0,55	0,9	8	248
Nov	1	0,8	1	0,7	0,9	9	270
Dic	1,1	0,8	1,1	0,9	0,8	11	341

Factor segundos del mes

Ene, Mar, Jul, Ago, Oct y Dic 2678400

Abr, Jun, Set, Nov  
Feb

2592000  
2419200

### 1. Cálculo de la Etc mensual (mm)

	Vid	Álamo	Alfalfa	Tomate	Cebolla
Ene	310	248	372	279	0
Feb	179,2	156,8	246,4	190,4	0
Mar	111,6	111,6	167,4	148,8	74,4
Abr	60	60	96	72	60
May	0	37,2	55,8	0	51,15
Jun	0	0	0	0	54
Jul	0	0	0	0	55,8
Ago	74,4	74,4	86,8	0	86,8
Set	144	117	153	0	144
Oct	223,2	173,6	235,6	136,4	223,2
Nov	270	216	270	189	243
Dic	375,1	272,8	375,1	306,9	272,8

### 2. Cálculo del requerimiento de riego mensual (m3)

	Vid	Álamo	Alfalfa	Tomate	Cebolla	Total
Ene	34.444.444	19.840.000	12.400.000	6.200.000	0	72.884.444
Feb	19.911.091	12.544.000	8.213.333	4.231.111	0	44.899.534
Mar	12.399.988	8.928.000	5.579.999	3.306.666	1.803.636	32.018.289
Abr	6.666.660	4.800.000	3.200.000	1.600.000	1.454.545	17.721.205
May	0	2.976.000	1.860.000	0	1.240.000	6.076.000
Jun	0	0	0	0	1.309.091	1.309.091
Jul	0	0	0	0	1.352.727	1.352.727
Ago	8.266.658	5.952.000	2.893.333	0	2.104.242	19.216.234
Set	15.999.984	9.360.000	5.099.999	0	3.490.908	33.950.892
Oct	24.799.975	13.888.000	7.853.333	3.031.111	5.410.908	54.983.327
Nov	29.999.970	17.280.000	8.999.999	4.200.000	5.890.908	66.370.877
Dic	41.677.736	21.824.000	12.503.332	6.819.999	6.613.332	89.438.400

### 3. Cálculo de las curvas de demanda

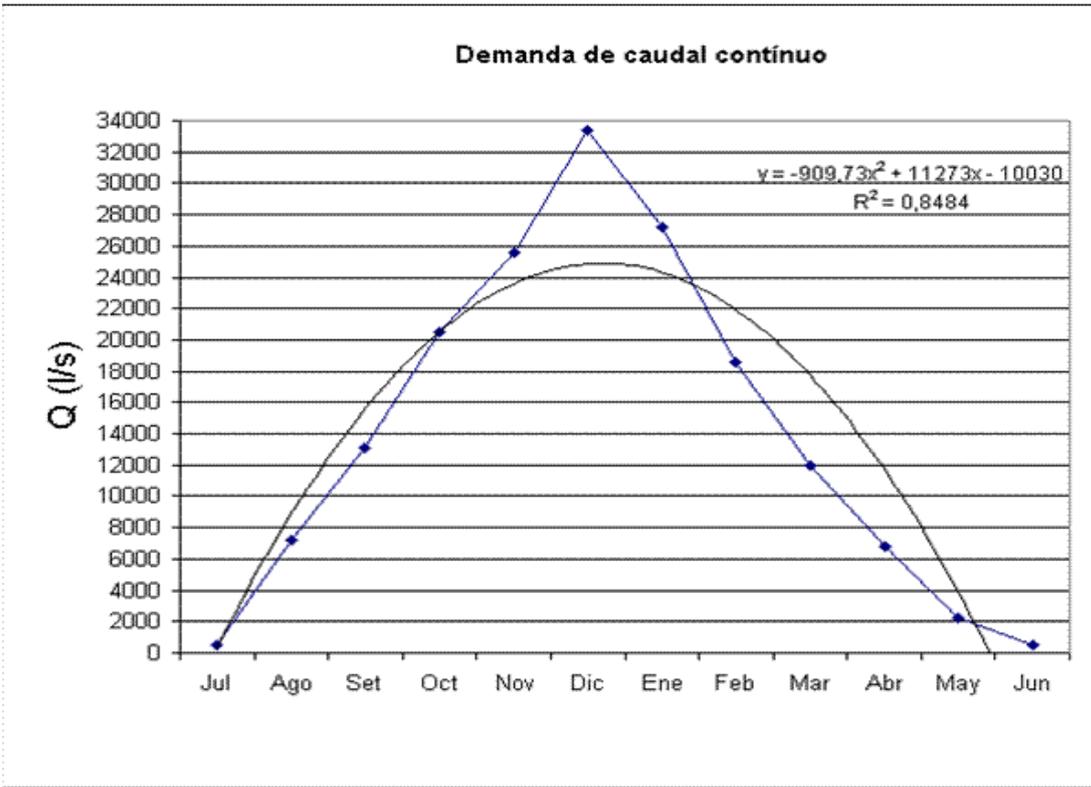
Meses	Volumen mensual (m3)	Cauda continuo (l/s)	Dotación (l/s/ha)
Ene	72.884.444	27.212	2,37
Feb	44.899.534	18.560	1,61
Mar	32.018.289	11.954	0,96
Abr	17.721.205	6.837	0,55
May	6.076.000	2.269	0,38
Jun	1.309.091	505	0,51
Jul	1.352.727	505	0,51
Ago	19.216.234	7.175	0,65
Set	33.950.892	13.098	1,19
Oct	54.983.327	20.528	1,64

Nov	66.370.877	25.606	2,05
Dic	89.438.400	33.392	2,67

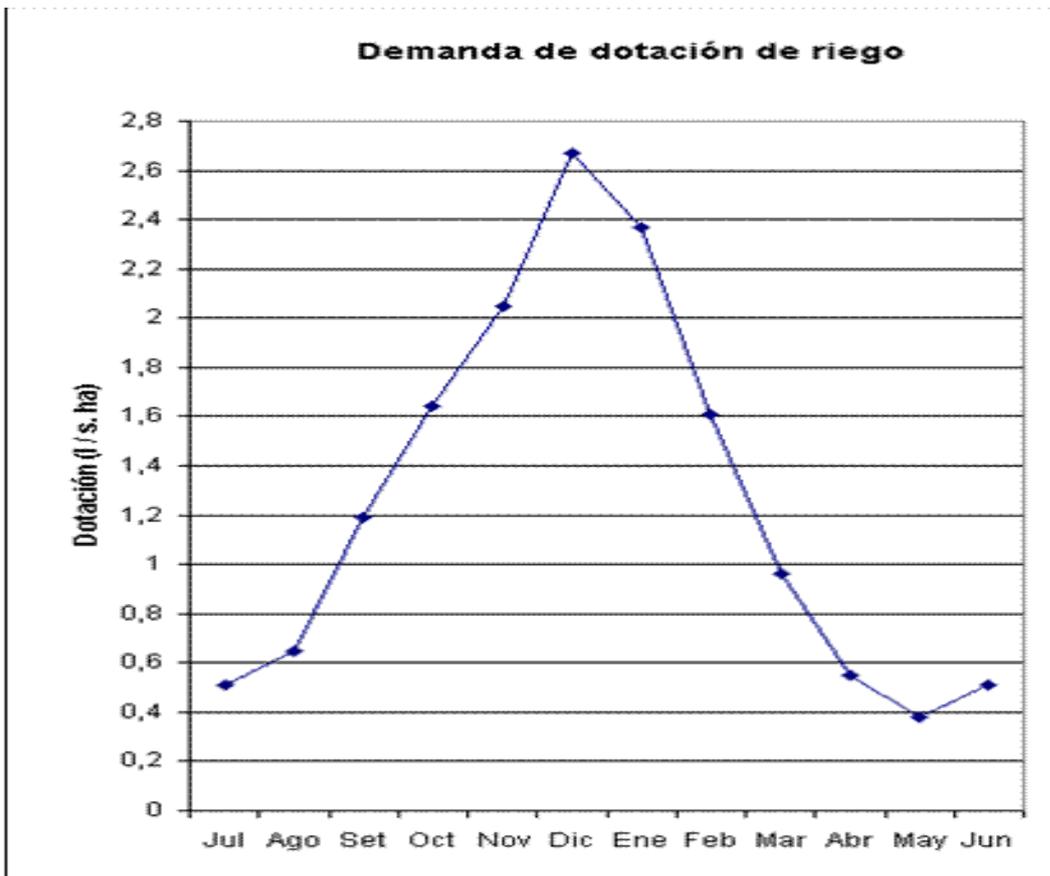
Meses	Volumen mensual (m3)	Cauda continuo (l/s)	Dotación (l/s/ha)
Jul	1.352.727	505	0,51
Ago	19.216.234	7.175	0,65
Set	33.950.892	13.098	1,19
Oct	54.983.327	20.528	1,64
Nov	66.370.877	25.606	2,05
Dic	89.438.400	33.392	2,67
Ene	72.884.444	27.212	2,37
Feb	44.899.534	18.560	1,61
Mar	32.018.289	11.954	0,96
Abr	17.721.205	6.837	0,55
May	6.076.000	2.269	0,38
Jun	1.309.091	505	0,51



Meses	Caudal cont. (l/s)
Jul	505
Ago	7175
Set	13098
Oct	20528
Nov	25606
Dic	33392
Ene	27212
Feb	18560
Mar	11954
Abr	6837
May	2269
Jun	505



Meses	Dot (l/s.ha)
Jul	0,51
Ago	0,65
Set	1,19
Oct	1,64
Nov	2,05
Dic	2,67
Ene	2,37
Feb	1,61
Mar	0,96
Abr	0,55
May	0,38
Jun	0,51



Como se puede observar en el ejemplo desarrollado, todo proyecto de riego y drenaje necesita diagnosticar o pronosticar las necesidades de agua, en términos de volumen, caudal continuo y dotación.

El riego propone equilibrar la oferta de agua (recursos hídricos disponibles) con la demanda (requerimientos hídricos de los cultivos, ineficiencia de los sistemas de captación, conducción y aplicación de agua, requerimiento de lixiviación, etc.)

Una manera de cuantificar la demanda es a través de la utilización de una metodología que considere las relaciones agua – suelo – planta – atmósfera y la operación de riego.

Se definen tres variables:

- Volumen de agua requerido  $V$  ( $m^3$ /mes)
- Caudal continuo  $Q$  (l/s)
- Dotación de riego  $Dot$  (l/s ha) =  $Q / Superficie$

A partir de la aplicación de metodologías de estimación de la Eto, se obtiene la Etc, usando

$$Etc \text{ (mm / día)} = Kc \cdot Eto \text{ (mm / día)}$$

Los valores mensuales de Etc se obtienen operando

$$Etc \text{ mensual (mm / mes)} = Etc \text{ diaria} \cdot \text{número de días del mes}$$

Sabiendo que,  $1 \text{ mm} = 10 \text{ m}^3/\text{mm} \cdot \text{ha}$ , se transforman láminas en volumen

$$Etc \text{ (mm / mes)} \cdot 10 \text{ m}^3/\text{mm} \cdot \text{ha} = (\text{m}^3 / \text{ha mes})$$

El volumen total requerido para atender el consumo de cada cultivo se obtiene

Volumen unitario ( $\text{m}^3 / \text{ha mes}$ ) . Superficie (ha) = ( $\text{m}^3 / \text{mes}$ )  
denominado **volumen mensual neto**

Al volumen mensual neto se lo incrementa atendiendo varios criterios:

- Eficiencia en la conducción de agua, que considera pérdidas en canales y acequias (entre 70% y 80%).
  - Eficiencia de aplicación de agua, que considera la naturaleza de la distribución del agua en el suelo de acuerdo a los distintos métodos de riego
- | Método de Riego | Eficiencia (%) |
|-----------------|----------------|
| Melgas          | 40 - 80        |
| Surcos          | 40 - 80        |
| Aspersión       | 60 - 80        |
| Microaspersión  | 80 - 90        |
| Goteo           | 80 - 95        |
- Requerimiento de lixiviación para mantener el balance salino de la solución del suelo cuando se utilizan aguas para riego con mediano a alto grado de mineralización. El requerimiento de lixiviación oscila entre 5% y 40%

A efectos de uniformar criterios en la selección del porcentaje de incremento de las necesidades de agua totales, se pueden acordar valores de

Eficiencia de conducción = 80%  
Eficiencia de aplicación =   surcos = 70%  
  melgas = 70%  
  aspersión = 85%  
  goteo = 90%  
Requerimiento de lixiviación = 20%

### Ejemplo

Calcular el volumen mensual neto requerido para satisfacer la demanda evapotranspirativa del pimiento, para una superficie de 0,9 ha, en el mes de Noviembre

$$\begin{aligned} E_{to \text{ nov}} &= 3,5 \text{ mm / día} \cdot 30 \text{ días} = 105 \text{ mm / mes} \\ K_c \text{ pimiento nov} &= 0,52 \\ E_{tc \text{ nov}} &= E_{to \text{ nov}} \cdot K_c \text{ pimiento} = 54,6 \text{ mm / mes} \\ \text{Vol neto nov} &= 54,6 \text{ mm / mes} \cdot 10 \text{ m}^3/\text{mm} \cdot \text{ha} \cdot 0,9 \text{ ha} = \\ &= 491,4 \text{ m}^3/\text{mes} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{Vol bruto o demanda volumétrica del pimiento} \\ \text{Vol bruto nov} &= 491,4 \text{ m}^3/\text{mes} / (0,9 \cdot 0,9 \cdot 0,9) \\ \text{Vol bruto nov} &= 758,3 \text{ m}^3/\text{mes} \end{aligned}$$

Calcular el caudal continuo ( $Q_c$ ) expresado en l/s y en  $\text{m}^3/\text{h}$

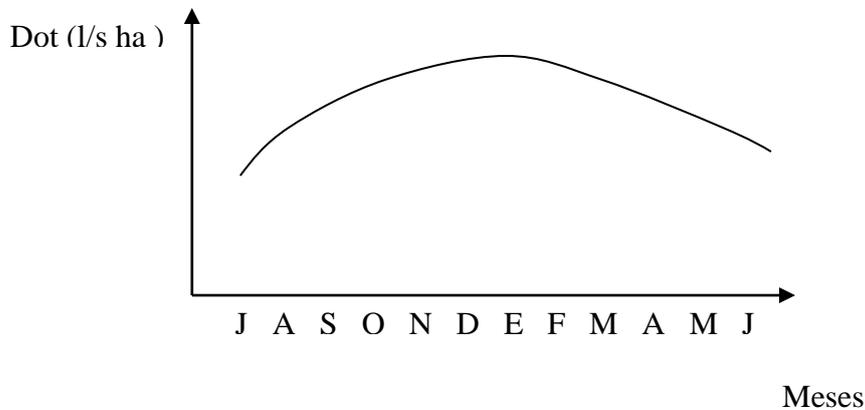
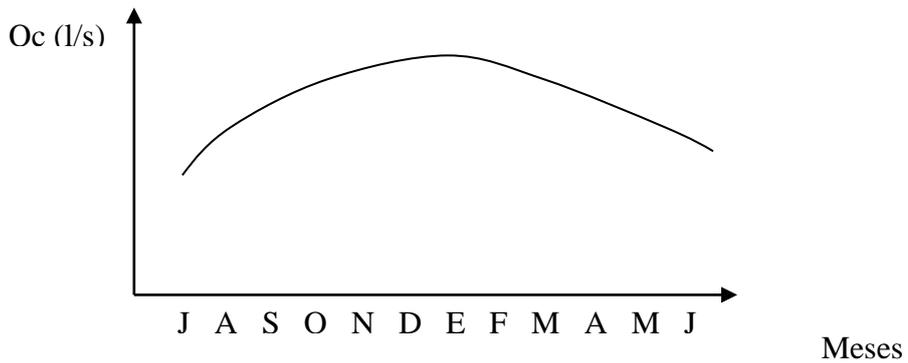
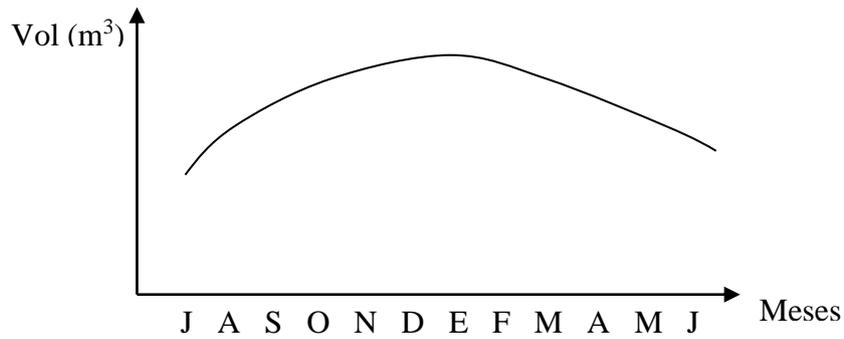
$$Q_c \text{ pimiento nov} = \frac{758,3 \text{ m}^3/\text{mes} \cdot 1000 \text{ l} / \text{m}^3}{30 \text{ d/mes} \cdot 24 \text{ h/d} \cdot 3600 \text{ s/h}} = 0,2926 \text{ l/s}$$

$$Q_c \text{ pimiento nov} = 0,2926 \text{ l/s} = 1053 \text{ l/h} = 1,053 \text{ m}^3/\text{h}$$

Calcular la dotación (Dot) requerida

$$\text{Dot} = Q_c / \text{superficie} = \frac{0,2926 \text{ l/s}}{0,9 \text{ ha}} = 0,325 \text{ l/s} \cdot \text{ha}$$

Con los valores calculados de volúmen,  $Q_c$  y dotación mensuales, construir las curvas de demanda para el año agrícola requerido, considerando los ciclos de los cultivos existentes.



## 9. Ejercitación.

1) Se desea confrontar la oferta y demanda hídrica de enero en un área de 1000 Ha con la siguiente información:

- a) plan de uso del suelo:
  - 60 % de alfalfa con riego por melgas; eficiencia de aplicación 60%.
  - 20 % de vid con riego por surcos; eficiencia de aplicación 50%.
  - 20 % de cebolla con riego por surcos; eficiencia de aplicación 50%.
- b) el déficit hídrico será cubierto por la captación de agua subterránea mediante pozos que suministrarán 96,41 m<sup>3</sup>/hora operándose 24 horas diarias.
- c) El aprovechamiento de las lluvias es del 76%
- d) La conducción de agua es por canales impermeables
- e) La oferta hídrica proviene de lluvias y del caudal continuo de un río, 1,5 m<sup>3</sup>/s

Mes	Eto (mm/d)	Pp (mm)	kc alfalfa	kc vid	kc cebolla
Enero	8	50	1,20	0,80	0,85

Se solicitan seis respuestas: oferta hídrica total en enero, demanda hídrica total en enero en volumen (m<sup>3</sup>), en caudal continuo (l/s) y en dotación de riego (l/s por Ha); déficit hídrico en enero y el número de pozos necesarios de construir y equipar para satisfacer el déficit hídrico de enero.

2) Se ha convenido con un cliente la realización de estudios para caracterizar la oferta y demanda hídrica de un establecimiento mixto de 1500 Ha, situado en la región semiárida. El análisis se realizará para el mes de máxima demanda, diciembre. La oferta de agua es de dos tipos: promedio de lluvias: 65 mm en 30 años de registro y un curso permanente cuyos caudales disponibles para ser utilizados con fines de riego, de los últimos años se detalla, aceptándose con fines de riego una probabilidad del 75%. El plan de uso del suelo, es el siguiente: 30 % de alfalfa de corte con kc = 1,2 y 60 cm de profundidad de riego, 20 % de vid con kc = 0,8 y 90 cm de profundidad de riego y 20 % de hortalizas con kc = 0,85 y 30 cm de profundidad de riego. La Eto máxima es de 4,5 mm/d. Se regarán las hortalizas por goteo, con una eficiencia de aplicación estimada del 85% y los demás cultivos por melgas, con una eficiencia de aplicación estimada del 60%. El requerimiento de lixiviación es del 5% Se establece un valor umbral de riego del 40% para los tres cultivos. Los estudios básicos del suelo aportan la siguiente información:

Estrato superficial 25 cm de espesor da=1,22g/cm <sup>3</sup>	Wc = 30%p/v	Wm = 14%	v/p
Estrato subsuperficial 65 cm de espesor da=1,22 g/cm <sup>3</sup>	Wc = 24%p/p	Wm = 18%	v/v

Los sistemas de riego gravitacionales son alimentados por un canal de sección rectangular por el cual el agua circula a una velocidad de 1,2 m/s.. El mismo tiene una base de fondo de 0,80m y en él se encuentra una compuerta trabajando libre, siendo la sección de su abertura de 0,04m<sup>2</sup>.

### Obtener los valores correspondientes a:

- a) la oferta hídrica total, expresada en volumen mensual (m<sup>3</sup>).
- b) la máxima demanda hídrica total, expresada en volumen mensual (m<sup>3</sup>), en caudal continuo (l/s) y en dotación de riego (l/s por Ha)
- c) Calcule las láminas brutas de reposición para regar cada cultivo en mm y d) sus correspondientes intervalos de riego en días

e) Calcule la sección del canal abastecedor en  $m^2$ , el tirante aguas arriba de la compuerta que funciona en el mismo en  $m$  y el radio hidráulico del canal.

#### Método del U.S. Bureau of Reclamation

Rango de precipitación (mm)	Porcentaje de efectividad
0 – 25	90
> 25 – 50	85
> 50 – 75	75
> 75 – 100	50
> 100 – 125	30
> 125 – 150	10
> 150	0

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Q dic (l/s)	731	720	701	710	730	700	695

3) Para caracterizar la oferta y demanda hídrica de 4.000 ha de tierras con aptitud para riego, se aplicará la metodología dada en el curso, para los meses de máxima y mínima demanda, diciembre y marzo. La oferta de agua es de dos tipos: promedio de lluvias: 76 mm en 40 años de registro, con una efectividad del 75% y agua proveniente del Río Seco, con un caudal mínimo de 8  $m^3/s$ , de muy buena calidad,  $CEa = 0,5$  dS / m y  $RAS=2,5$ . Se planifica regar en el primer año, 3.000 ha de los cultivos que abajo se detallan y 1.000 ha serán lavadas hasta que sean aptas para la siembra de cebada en el segundo año. La Eto del lugar es de 5,0 mm/d en diciembre y 3,0 mm/d en marzo. A las 1.000 ha salinas se les aplicarán 4 láminas de lavado de 150 mm cada una, dos durante el mes de diciembre, una en febrero y otra en abril.

El cronograma de cultivo es:

- . 40% álamos, con  $k_{C\diciembre}= 0,8$ ;  $k_{Cmarzo}= 0,5$  y 100 cm de prof. efectiva de raíces, a regar por surcos con  $Efa= 50\%$ , de septiembre a abril inclusive.
- . 10 % hortalizas, con  $k_{C\diciembre}= 0,85$ ;  $k_{Cmarzo}= 0,55$  y 30 cm de prof. efectiva de raíces, a regarse por goteo, con  $Efa= 85\%$ , de octubre a febrero.
- . 50% alfalfa para pastoreo directo, con  $k_{C\diciembre}= 1,2$ ;  $k_{Cmarzo}= 0,6$  y 50 cm de prof. efectiva de raíces. Se regará por melgas, con efic. de aplicación  $Efa= 60\%$ , de agosto a mayo.

Los umbrales críticos se unifican para los cultivos, tomándose para diciembre  $Ur = 45\%$  y para marzo  $Ur = 50\%$ . Se consideran homogéneos los suelos, presentando una capa superficial de 25 cm de espesor, con  $Wc = 22\%P/P$ ,  $Wm= 14,4\%P/V$ ,  $da= 1,2$   $g/cm^3$  y una capa subsuperficial, de 85 cm de espesor, con  $Wc= 28\%V/V$ ,  $Wm= 10\%V/P$ ,  $da= 1,4$   $g/cm^3$

#### Obtener los valores correspondientes a:

- a) la oferta hídrica total para los meses de diciembre y marzo, expresada en volumen mensual ( $m^3$ ).
- b) la máxima demanda hídrica total, expresada en volumen mensual ( $m^3$ ), en caudal continuo (l/s) y en dotación de riego (l/s por Ha) para los meses de máximos y mínimos requerimientos hídricos.

- c) Calcule las láminas brutas de reposición para regar cada cultivo, durante el mes de diciembre, en mm
- d) Calcule los intervalos de riego para regar cada cultivo, durante el mes de diciembre, en mm
- e) Verifique si podrá o no regarse el área propuesta con el caudal mínimo disponible y en cualquiera sea el caso, indique el caudal sobrante o faltante

**Puntos a considerar:**

- Indique las determinaciones más comunes a realizar sobre el agua para riego

**10. Bibliografía.**

ARENS, P. 1969. Algunos efectos del riego suplementario sobre los suelos de la pampa ondulada. Actas de la 5ta. Reunión de la A.A.C.S. Santa Fe pp 98-102.

AYERS, R. & D. WESTCOT. 1987. La calidad del agua para la agricultura. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Irrigation and drainage papers. N° 29 bis. Ed. FAO. Roma.

CARRICABURU, J. 1998. Calidad de agua para riego. Aguas subterráneas uruguayas. Actas del 4to. Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea.: 1107-1113.

GENOVA, L. 1988. Impacto de las aguas bicarbonatadas sódicas en suelos regados complementariamente en la región típica maicera de la Pcia. de Buenos Aires. Documento de informe de avance. Carta acuerdo RLAC-FAO-UNLP. La Plata. 88 pp.

GENOVA, L. 1988. Impacto de las aguas bicarbonatadas sódicas en suelos regados complementariamente en la región típica maicera de la Pcia. de Buenos Aires. Documento de informe de avance. Carta acuerdo RLAC-FAO-UNLP. La Plata. 88 pp.

GENOVA, L. 1989. Taller FAO sobre Análisis de métodos empleados en la recuperación de tierras y la prevención de la degradación de tierras bajo riego y drenaje de América Latina. Riego complementario en el norte de Buenos Aires: bases para prevenir la degradación de suelos. Organizado por la RLAC-FAO y el Programa Nacional de Drenaje de Tierras del Perú PRONADRET. 24 y 29 de octubre de 1989. Chiclayo, Perú.

GENOVA, L. 1992. Evaluación del impacto del riego complementario con aguas bicarbonatadas sódicas en los suelos del norte de la Pcia. de Buenos Aires. Actas del V Congreso Nacional de Maíz '92 y II Reunión Suramericana. Capítulo II 86:89 pp. Octubre de 1992. Pergamino.

GENOVA, L. 1993. Estudio de la degradación de suelos bajo riego complementario de cultivos extensivos con aguas subterráneas del acuífero Pampeano en el norte de Buenos Aires. XIV Congreso Argentino de la Ciencia del suelo. 347:348 pp. Octubre de 1993. Mendoza.

GENOVA, L. 1994. Riego complementario de maíz, soja y trigo en el norte de Buenos Aires: efectos de la salinidad de las aguas subterráneas en los suelos y su influencia en los rendimientos. Actas del Primer Congreso Internacional de Ingeniería Agrícola. Patrocinado

por la FAO, la American Society of Agricultural Engineers ASAE y el CONICYT Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de Chile. Univ. de Concepción, Chile.

GENOVA, L. 1994. Riego complementario del cultivo de maíz: análisis comparativo de costos totales de riego de cinco tipos de equipamiento. Actas del Primer Congreso Internacional de Ingeniería Agrícola. Patrocinado por la FAO, la American Society of Agricultural Engineers ASAE y el CONICYT Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de Chile. Universidad de Concepción, Chillán, Chile.

GENOVA, L. 1995. Riego complementario de cultivos extensivos: pautas para su adopción. Revista Procampo, Año IV, 24: 8-12 pp. Buenos Aires.

GRENON, D. 1988. Modificaciones producidas por el riego complementario en un suelo Argiudol de Pergamino, Bs As. Convenio IICA-SAGyP. 18 pp.

INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA AGROPECUARIA. 1998. Síntesis de discusión del taller sobre calidad de aguas para riego. Proy. IPG. Noviembre 9-10 de 1998. Pergamino. 3 pp.

ISRAELSEN, O. y V. HANSEN. 1979. Principios y aplicaciones del riego. Ed. Reverté. Barcelona.

LAVADO, R. 1976/77. Salinización y alcalinización de suelos pampeanos bajo riego complementario. Rev. de Investigaciones Agrícolas INTA XIII (2):41-57.

MAAS, E. 1984. Salt tolerance of plants. In The Handbook of plant science in agriculture. B. Christie Editor. CRC Press. Florida. USA.

MAAS, E. & G. HOFFMAN. 1977. Crop salt tolerance. J. of Irrigation and drainage Division. ASCE, 103 (IRZ) 115-134. Proceeding paper 12993.

PROGRAMA DE SERVICIOS AGRARIOS PROVINCIALES. PROSAP. 1995. Riego complementario. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación. Buenos Aires.

U.S. SALINITY LAB. RICHARDS, L (ed) 1953. Handbook 60. Traducción " Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos". Ed. Limusa. México.

WYCKERS, A. & L. GENOVA. 1987. Evaluación del efecto del riego complementario en el cultivo de maíz con aguas bicarbonatadas sódicas en la región típica maicera. Trabajo de Intensificación Fac. de Agronomía UBA. 45pp.

WILCOX, L. 1948. The quality of water for irrigation. US Depto of Agric. Tech Bull. N° 962:1-40