

Sistemática para la medición de caudal y el control de la calidad de los retornos de riego

Daniel Isidoro (disidoro@aragon.es)

Unidad de Suelos y Riegos (Unidad Asociada EEAD-CSIC)

Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón
(CITA)

Diputación General de Aragón

Avda. Montañana 930. 50.059-Zaragoza

Esquema de la presentación

1. **Cómo se diseña un plan de muestreo**
2. **Definición de los objetivos**
 - ❑ Qué queremos obtener con el muestreo
 - ❑ ... A partir de nuestro modelo conceptual previo del sistema a estudiar (a verificar con el muestreo)
3. **Diseño del plan de muestreo**
 - ❑ Parámetros a analizar
 - ❑ Ubicación de las estaciones o puntos de muestreo
 - ❑ Frecuencia de muestreo y número de muestras
4. **Muestreo**
 - ❑ Toma y manejo de muestras
 - ❑ Medida de caudales
5. **Análisis de laboratorio**
 - ❑ Replicados y precauciones analíticas
6. **Interpretación de los resultados**



- Objetivos del muestreo
- Definición de los objetivos del muestreo**
- ❑ Qué queremos obtener con el muestreo
 - Reconocimiento (identificar y cuantificar someramente problemas de calidad de aguas en el territorio)
 - Detecciones de violaciones de NCA (concentración de sustancias concretas)
 - Detección de vertidos (muestreos puntuales específicos o seguimientos de alta frecuencia)
 - Estimación de masas exportadas → Caudal (Q)
 - Balances de masas en cuencas (completar las masas exportadas con medidas de las entradas)
 - Determinar tendencias en concentración o masa
 - ❑ ... A partir de nuestro modelo conceptual previo del sistema a estudiar (a verificar con el muestreo)
 - Nuestra hipótesis: Contaminación de origen agrario (regadío)
 - Verificar si es cierto o no o cuantificar en qué medida

Objetivos del muestreo

¿Cuál es el objetivo de una red de muestreo de retornos de riego (RAA)?

Conocer los principales problemas sobre la calidad de las aguas que está induciendo el regadío y su distribución sobre el territorio

- ❑ Muestreo de reconocimiento (RAA: 2005-06)
 - Selección de puntos representativos del regadío
 - ❑ Cuencas bien definidas con predominio del regadío
 - ❑ Que representen todos los sistemas de riego y prácticas de manejo y características físicas del territorio
 - ❑ Caracterización de las cuencas (identificar situaciones de manejo con problemas de calidad)
 - Muestreo más o menos periódico manual:
 - ❑ Medir Q y parámetros de calidad de interés
 - ❑ Estimación aproximada de masas exportadas

Objetivos del muestreo

¿Cuál es el objetivo de una red de muestreo de retornos de riego (RAA)?

**Establecer el efecto del regadío sobre la calidad de las aguas:
Medir caudal, Q (MASA = Concentración · Q)**

- ❑ Parámetros a medir:
 - Caudal:
 - ❑ Realizar mediciones puntuales
 - ❑ Construir estaciones de aforo
 - Parámetros de calidad afectados por el regadío:
 - ❑ Salinidad (CE → SDT) [y pH, de interés químico]
 - ❑ Nutrientes (N y P)
 - ❑ Plaguicidas
 - ❑ Sedimentos (cuencas de pendiente elevada, sin nivelación)
 - ❑ Parámetros ligados a la contaminación orgánica (OD, DBO₅, DQO₅) → Actividad ganadera
 - ❑ Parámetros biológicos (macroinvertebrados) → Muestreo diferente
 - ❑ Muestreo de plaguicidas → Muestreo multimedia (sedimentos, biota)

Objetivos del muestreo

¿Cuál es el objetivo de una red de muestreo de retornos de riego (RAA)?

**Establecer el efecto del regadío sobre la calidad de las aguas:
Medir Q ($MASA = Concentración \cdot Q$)**

- ❑ Seleccionar los puntos de control:
 - Cuenca con predominio del regadío
 - ❑ Secano poco extenso
 - ❑ Incluir estimas de la contribución del secano (nuevos puntos de muestreo)
 - Controlar especialmente la estación de riego
 - ❑ Efecto del regadío ~ Masa exportada durante la ER
 - ❑ Aproximación; pero la contribución en la ER suele ser bastante mayor y la de la E no R es independiente del regadío
- ❑ Frecuencia de muestreo (número de muestras)
 - Vinculada a la variabilidad de los parámetros a determinar (la masa exportada es el parámetro a determinar)
 - Precisión en la estimas → Número de muestras

Objetivos del muestreo

¿Cuál es el objetivo de una red de muestreo de retornos de riego (RAA)?

Establecer los factores de manejo que más influyen en la contaminación del regadío: Buenas Prácticas Agrarias

- ❑ Establecer las prácticas de manejo dentro de la cuenca:
 - En cooperación con las CC.RR.
 - Generar información en la cuenca sobre:
 - ❑ Manejo del riego y cultivos (bases de datos de CR)
 - ❑ Manejo de la fertilización mineral y orgánica } Encuestas
 - ❑ Manejo de plaguicidas
 - ❑ Propiedades físicas de los suelos → Muestreo de suelos
 - Balance de agua en la cuenca → Confirmación de que estamos muestreando bien el sistema (retornos del regadío)
- ❑ Aplicación de modelos de transporte de sales y nutrientes (también plaguicidas)
 - Calibración y validación (toma de datos y ajuste de los parámetros del modelo a las medidas de campo)
 - Simulación de escenarios → Determinar BPA
 - Red de muestreo para verificación de los modelos: Selección de cuencas con características físicas y manejo diferentes

Diseño del muestreo

Diseño del plan de muestreo

- ❑ Parámetros a analizar/medir
 - Conocimiento previo del problema (mayor interés en nutrientes o sales, etc.)
 - Básicamente los ya citados: salinidad, nutrientes, plaguicidas, (sedimentos y contaminación orgánica)
 - Análisis de aguas: sedimentos, biota... diferentes
- ❑ Ubicación de las estaciones o puntos de muestreo
 - Representatividad
 - ❑ Por la presencia de aportes aguas arriba 
 - ⊗ Asegurarse una cierta distancia aguas abajo de las confluencias o los vertidos
 - ⊗ Más importante para SS
 - ❑ Por las características de la cuenca (regadío)
 - ⊗ Si existe presencia de otras fuentes de contaminación (urbana o ganadera → Identificar y estimar)
 - Facilidad/seguridad de acceso
 - ❑ Muestreos puntuales: involucrar a encontrar el sitio! (GPS)

Diseño del muestreo

Diseño del plan de muestreo

- ❑ Frecuencia de muestreo y número de muestras
 - Problema estadístico ligado a la variabilidad (varianza= V) de la población que queremos estimar (masas diarias de N exportadas, concentración media diaria o mensual, p. ej., de SDT...)

 - Problemas en la elección del intervalo de muestreo: Presencia de ciclos en la variable estudiada

 - Problemas derivados de la relación entre Q y las concentraciones de sólidos disueltos u otras

 - Buscar asesoramiento estadístico en el diseño (según la importancia del muestreo) → Pero el primer paso es siempre un muestreo

Muestreo: toma de muestras

Muestreo

- ❑ Toma y manejo de muestras (salinidad, N, P...)
- ❑ Medida de caudales

Toma y manejo de muestras en campo

- ❑ Toma de muestras a mano
 - Parámetros medibles in-situ (CE, NO_3) 
 - Medida de la salinidad: a través de la CE (relación específica entre SDT y CE para cada punto) 
 - ❑ Muestreo intenso para CE y medida de un número suficiente de SDT para establecer la relación SDT-CE
 - ❑ Botes de plástico para SDT (1 L- 1.5 L) y CE (100 mL)
 - ❑ SDT: Residuo seco en estufa y $\frac{1}{2}$ bicarbonato (valoración)
 - Plaguicidas: Adsorción a las paredes, degradación por la luz, necesidad de volúmenes grandes → Bote de vidrio ámbar 1 L
 - Fósforo, PT y PDT: Adsorción → Botes de vidrio ámbar (200 mL)
 - Nitrato (N) → Bote de plástico (100 mL)
 - Sedimentos-SS → Por pesada del sedimento y por turbidimetría (en laboratorio) → Bote de plástico 1L

Muestreo: toma de muestras

Toma y manejo de muestras en campo

- ❑ Toma de muestras a mano
 - Precauciones analíticas
 - ❑ NO_3 y P pueden degradarse por actividad de microorganismos → Fijación con ácido (pH = 4) 
 - ❑ En aguas bien aireadas, el N se encuentra como nitrato (NO_3) y el amonio (NH_4) es despreciable → Comprobar que es así: en aguas con contaminación orgánica puede predominar el NH_4 o el N orgánico
 - ❑ El P se encuentra disuelto (PDT principalmente fosfato, PO_4) y adsorbido a las partículas (P particulado, PP), de ahí la necesidad de medir el fósforo total (PT=PDT+PP)
 - ✳ Además, el efecto de cada fracción de P (PP y PDT) sobre la calidad del ecosistema es distinto (eutrofización)
 - ❑ Los sólidos en suspensión (SS) varían en profundidad: Necesidad de muestrear a diversas profundidades
 - ❑ Algunos plaguicidas y P tienden a adsorberse a los SS → Análisis sobre muestras sin filtrar
 - ❑ Complejidad de los plaguicidas → Muestreo Multimedia

Muestreo: toma de muestras

Toma de muestras en campo

- ❑ Utilización de equipos tomamuestras. Posibilidades:
 - Muestreos de mayor frecuencia
 - ❑ Menos salidas al campo
 - ❑ Identificación de procesos interesantes: aportes de agua de canales (diluyentes), vertidos puntuales...
 - Muestreo estratificado (más muestras a mayores caudales → mejor estima de la masa exportada)



Muestreo: medición de caudales

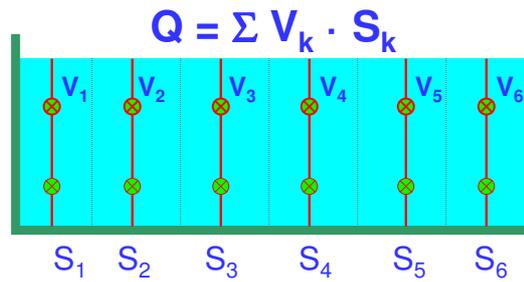
Medición de caudales

- ❑ Medida de caudales con aforador
 - Medidas de caudal con molinete
 - Caudalímetros de ultrasnidos (visita) y electromagnéticos
 - Medidas de caudal por dilución
 - Medidas con flotador (aproximado)
- ❑ Instalaciones de aforo
 - Selección del punto de instalación del aforo
 - ❑ Rehuir las curvas y las incorporaciones de afluentes
 - ❑ Pendiente suficiente (fuerte). Ideal → Caída calra aguas abajo
 - Mantener limpia la sección y las aproximaciones aguas arriba y aguas abajo (rugosidad)
 - Calibrar la curva de gasto (comprobar la curva de diseño con medidas de caudal in situ)
 - Selección del tipo de instalación

Muestreo: medición de caudales

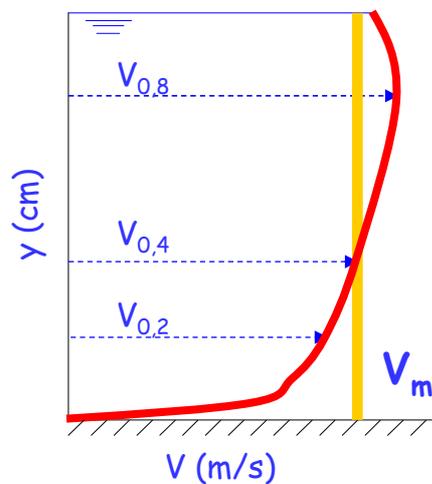
Medición de caudales con molinete

- ❑ División del cauce en dovelas
 - Definir la forma del cauce y anchura de la lámina libre
 - Establecer las dovelas y calcular su área (S)
- ❑ Medición de la velocidad (V) en el centro de cada dovela
- ❑ Suma de los productos de Integración de las velocidades



Muestreo: medición de caudales

Distribución de velocidades en una vertical



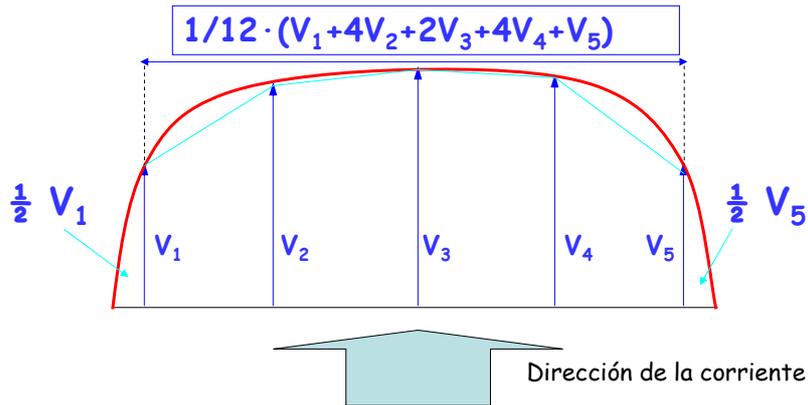
$V_m = V_{0,4}$ si $y < 10$ cm

$V_m = \frac{1}{2} \cdot (V_{0,2} + V_{0,8})$
para $y > 10$ cm

Muestreo: medición de caudales

Distribución de la velocidad media vertical en el ancho del cauce

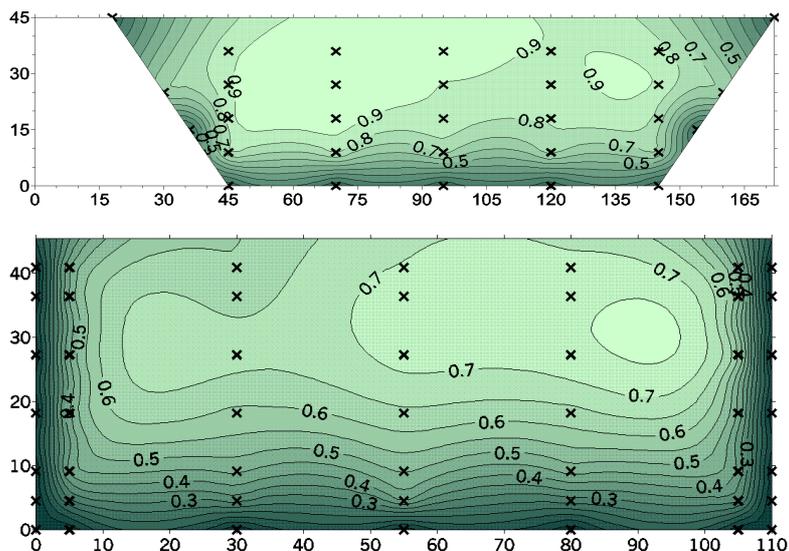
- Mayor sensibilidad en la parte central del cauce



Muestreo: medición de caudales

Ejemplos de distribución de velocidades (acequias)

- Gran irregularidad → Repetir mediciones



Medición de caudales con molinete

❑ Precauciones

- Elegir una sección regular con tramos rectos aguas arriba y aguas abajo
- No obstruir la sección (no medir desde dentro si es posible)
- Comprobar que no se producen variaciones del nivel durante el aforo
- 2 medidas de 30 s (más si son muy dispares)
- Leer el calado en cada punto durante un tiempo suficiente
- Movimiento regular de la hélice (o del contador), atención a las algas

Selección de instalaciones de aforo



❑ Vertederos de pared delgada

- Triangulares $Q \approx K \cdot H^{5/2}$ → Caudales pequeños
- Rectangulares $Q \approx K \cdot H^{3/2}$ → Caudales grandes
- Trapeciales → Mayor rango de caudales
- Se necesita una velocidad de aproximación baja (remanso)

❑ Vertederos de pared ancha: Realces de solera, estrechamientos, aforadores Parshall [visita]

- Necesidad de disponer de cierta altura de energía (suficiente pendiente: caída aguas abajo)
- El aforador Parshall puede funcionar sin caída aguas abajo (ahogado) → Toma de dos lecturas de altura
- Descarga de "Winflume" para el diseño de secciones de control:
http://www.usbr.gov/pmts/hydraulics_lab/winflume/
- Diseño y construcción → Empresas de ingeniería

Muestreo: medición de caudales

Instalaciones de aforo

- ❑ Registro de alturas cuasi-continuo (papel o digital)
- ❑ Medición de las alturas en un pozo de remanso



Análisis de laboratorio

Análisis de laboratorio

- ❑ Precauciones analíticas
 - Comprobar la calidad de los análisis (análisis iónicos completos, relación SDT-CE...)
 - Comprobar la replicabilidad de los resultados
 - ❑ Enviar muestras duplicadas al laboratorio periódicamente ()
 - ❑ Enviar patrones preparados de concentración conocida periódicamente (los laboratorios suelen incorporar estos controles)
 - Puntualmente se pueden enviar duplicados a otros laboratorios

Interpretación de los resultados

¿Estamos obteniendo los resultados que esperábamos?

- ❑ Los balances de agua no cuadran ($\epsilon > \pm 10\%$)
 - Revisar la definición del sistema (entradas no controladas)
 - Re-evaluar las entradas y salidas
- ❑ Las masas exportadas no se calculan con suficiente precisión:
Revisar el diseño del muestreo (frecuencia)
 - Sólo lo sabremos a través de un muestreo puntual más intenso
 - ❑ Intensificar la frecuencia de muestreo (aumentar el número de muestras)
 - ❑ Introducir un muestreo estratificado (más muestras a caudales más altos), si el problema se produce en periodos de caudales altos
 - Posibilidad de reducir la intensidad de muestreo (manteniendo estimas de suficiente precisión)
- ❑ Muestreos más intensos de comprobación:
 - La hora y frecuencia de muestreo son adecuadas
 - Las masas se estiman con suficiente precisión

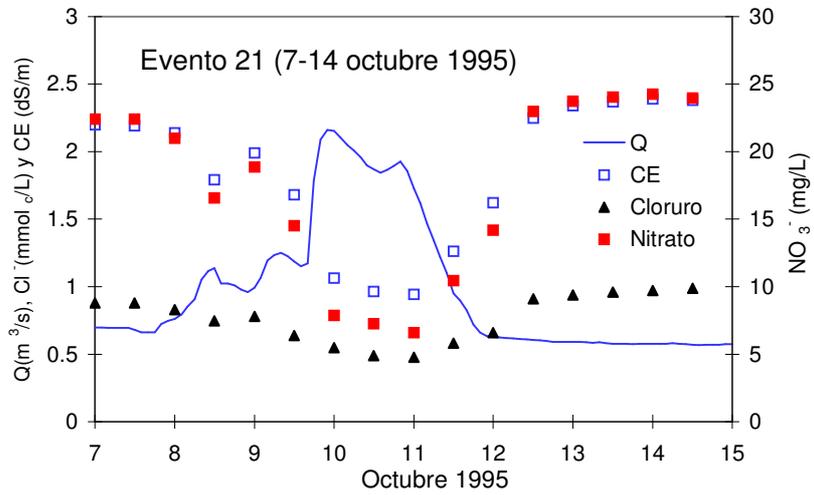
Conclusiones

El control de los retornos de riego:

- ❑ Es una práctica posible para las CC.RR.
 - Control de baja frecuencia (reconocimiento): medidas in-situ de Q, salinidad y NO_3 (p.ej.) sin el concurso de laboratorios externos
 - Control de baja frecuencia de parámetros delicados (P, plaguicidas) → Colaboración de laboratorios externos
 - Control de alta frecuencia (medición en continuo de Q y muestreo \pm diario de CE y NO_3):
 - ❑ Instalación de aforo
 - ❑ Muestreadores automáticos } Inversión mayor → Comunidad General
- ❑ Estudio de las cuencas: análisis del manejo del riego para establecer relaciones causa-efecto
 - Trabajo más intenso a nivel de campo (muestreos de suelos, encuestas, recopilación de datos hidrológicos)
 - ❑ Colaboración de centros de investigación, universidad...
 - ❑ Participación de empresas de consultoría
 - Empleo de modelos de transporte de solutos (BPA) → Colaboración
- ❑ Absoluta disponibilidad del CITA para colaborar en el seguimiento de los retornos de riego



Episodio de dilución en el Bco Violada (muestreo cada 12 horas)





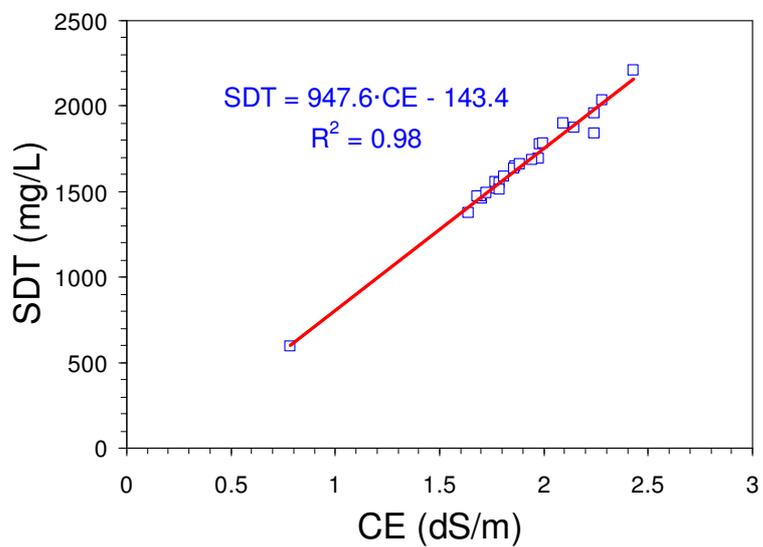
← Conductímetro de campo

Medidor semi-cuantitativo de NO₃ (también existen para NH₄, sodio...)

↓



Relación SDT-CE en La Violada (D-14)



Fijación con ácido (acidificación hasta pH=4) en muestras para NO_3 y PO_4



Aforador
triangular



Construcción de un aforador en vertedero
de pared ancha (realce de solera)



Construcción de un aforador en vertedero de pared ancha (realce de solera)



Construcción de un aforador en vertedero de pared ancha (realce de solera)



Construcción de un aforador en vertedero de pared ancha (realce de solera)



Construcción de un aforador en vertedero de pared ancha (realce de solera)



Estrechamiento con realce de solera (P-9)



Aforador Parshall (P-9)

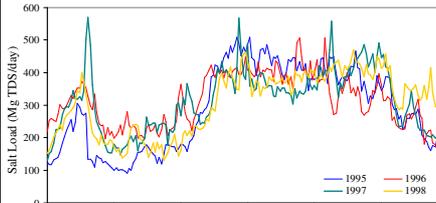


Diseño del muestreo



Población: 183 valores diarios de masa de sales

Muestra: N valores diarios
Media = m



Varianza V - Diferencia admisible M-m

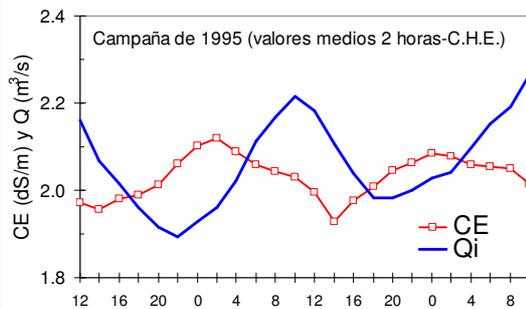
Número de muestras necesario: N

Media = μ
Varianza = V

Muestreo:

- Sistemático (cada T días con $T=183/N$)
- Estratificado: se dividen los elementos a muestrear en estratos según su Q y se muestrea con distinta periodicidad cada estrato

Diseño del muestreo



- Presencia de ciclos en Q y/o concentraciones → Necesidad de elegir la hora de muestreo para no introducir sesgo en la estima de la masa diaria

