LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

ENSAIOS DE RECARGA ARTIFICIAL E APLICAÇÃO DE MÉTODOS GEOFÍSICOS NO LEITO DO RIO SECO (PROJECTO GABARDINE)

Catarina DIAMANTINO [(a)]

João Paulo LOBO-FERREIRA [(a)]

Rogério MOTA [(b)]

Laboratório Nacional de Engenharia Civil

(a) Núcleo de Águas Subterrâneas - Departamento de Hidráulica

(b) Núcleo de Geologia de Engenharia e Geotecnia Ambiental - Departamento de Geotecnia

9º CONGRESSO DA ÁGUA

APRH

Água: desafios de hoje, exigências de amanhã

Centro de Congressos de Cascais

2 a 4 de Abril 2008

© LNEC 2006

ENSAIOS DE RECARGA ARTIFICIAL E APLICAÇÃO DE MÉTODOS GEOFÍSICOS NO LEITO DO RIO SECO

(PROJECTO GABARDINE)

Sumário:

1. Sobre o Projecto GABARDINE
   a) Objectivos
   b) Casos de estudo

2. Localização da área de estudo e principais problemas de poluição das águas subterrâneas

3. Descrição do sistema de recarga artificial em Carreiros
   a) Cenários monitorizados (recarga natural e recarga artificial)
   b) Resultados obtidos (qualidade e quantidade)

4. Ensaios de recarga artificial com traçador salino
   a) Resultados obtidos (qualidade e quantidade)

5. Aplicação de métodos geofísicos de resistividade eléctrica

6. Conclusões

7. Agradecimentos

© LNEC 2006

1a) Projecto GABARDINE

6º Programa-Quadro de Investigação da UE (Nov. 2005 – Out. 2008)

"Groundwater artificial recharge based on alternative sources of water: Advanced integrated technologies and management"

Internet site: www.gabardine-fp6.org

Principal objectivo: "*Identificar fontes de água alternativas destinadas à recarga artificial de aquíferos e investigar a viabilidade ambiental e económica da sua utilização no contexto de uma gestão integrada dos recursos hídricos"*

(a) Investigar a possibilidade de incrementar os recursos hídricos disponíveis em zonas semi-áridas através de **fontes de água alternativas** artificialmente recarregadas nos aquíferos, e.g.:

- Escoamento superficial gerado durante eventos de precipitação intensos
- Águas residuais tratadas
- Água dessalinizada excedentária

(b) Investigar a **viabilidade de utilização dos aquíferos** como meio principal para o armazenamento sazonal e a longo prazo destas fontes alternativas de água. Melhorar o conhecimento sobre as metodologias para a sua recarga artificial.

(c) Avaliar o **impacto de fenómenos modificadores** (alterações climáticas, intrusão salina, etc) e propor medidas para prevenir ou mitigar o seu impacto.

(d) Desenvolver um **Sistema de Suporte à Decisão** destinado a uma gestão eficiente do uso da água no contexto da recarga artificial de aquíferos**.**

© LNEC 2006

1b) Casos de estudo do Projecto GABARDINE

WP5 / LNEC

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

	Objectivo da recarga artificial (RA)
LLOBREGAT LOWER VALLEY (Espanha)	Gestão integrada/recuperação do *good status* (qualidade e quantidade) através de recarga artificial de água superficial
SISTEMA AQUÍFERO DA CAMPINA DE FARO (Portugal)	**Reabilitação da qualidade da água subterrânea através da recarga artificial do escoamento superficial**
AQUÍFERO COSTEIRO PARTILHADO POR ISRAEL E PALESTINA (Faixa de Gaza)	A recarga artificial de aquíferos constitui uma metodologia amplamente implementada. Definir propostas de gestão que integrem a recarga artificial com recurso a diferentes fontes de água disponíveis (água subterrânea, água residual tratada, água dessalinizada, etc.)
BACIA DE SINDOS - THESSALONIKI (Grécia)	Controlo da intrusão salina e armazenamento subterrâneo de água residuais tratadas.

Diversos problemas de abastecimento de água :
Sobre-exploração,
Intrusão salina,
Poluição difusa,
etc.

Solução viável ?

Recarga Artificial
de fontes de água alternativas

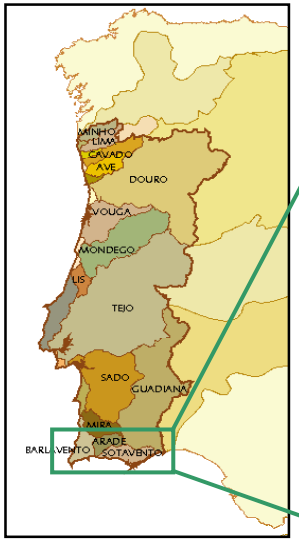
© LNEC 2006

9º CONGRESSO DA ÁGUA

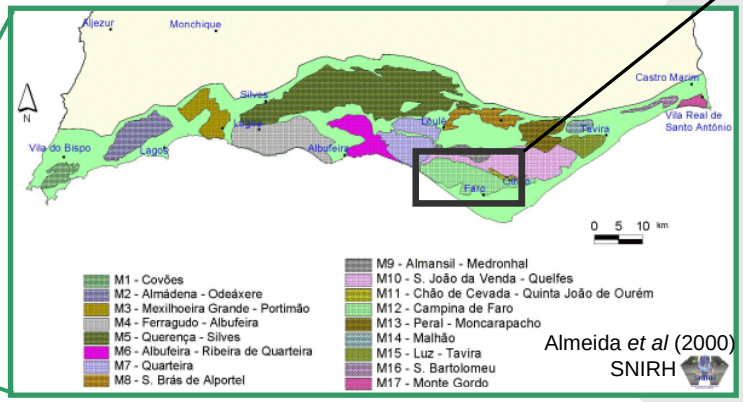
2) Localização das áreas de estudo no âmbito do Projecto Gabardine – componente Portuguesa

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

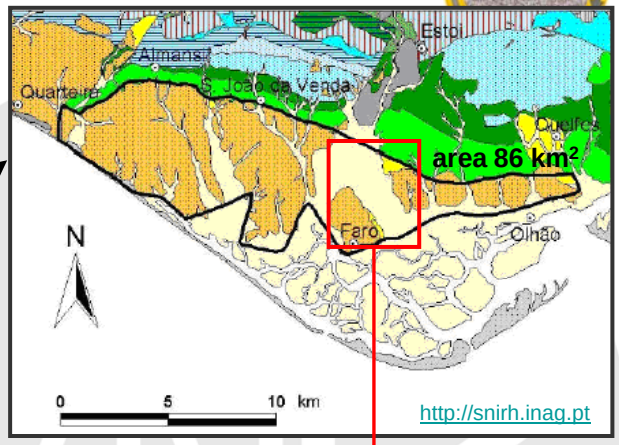
Sistema aquífero da Campina de Faro
(mapa geológico)



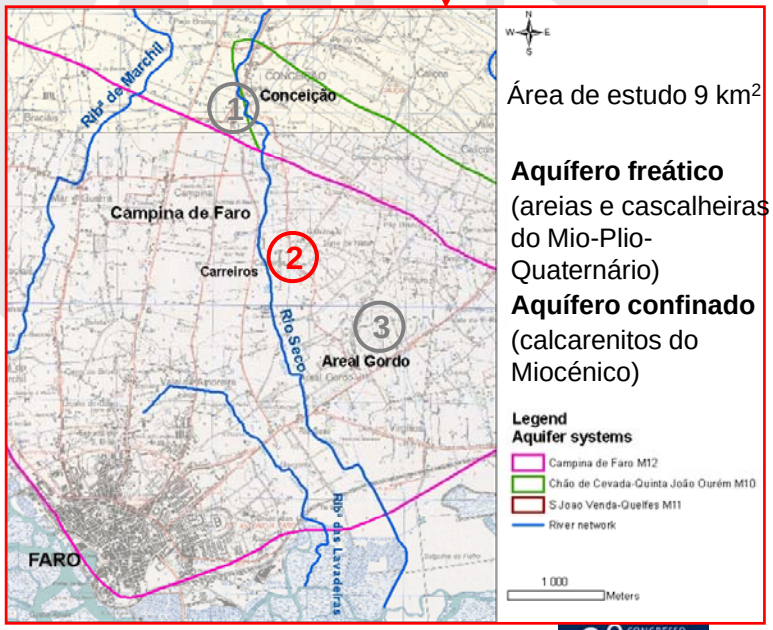
Algarve / Faro



Almeida *et al* (2000)
SNIRH



http://snirh.inag.pt



3 áreas de estudo na Campina de Faro

1 – Caso de estudo de Conceição
2 – Caso de estudo de Carreiros
3 – Caso de estudo de Areal Gordo

© LNEC 2006

9º CONGRESSO DA ÁGUA

2) Principais problemas nas águas subterrâneas

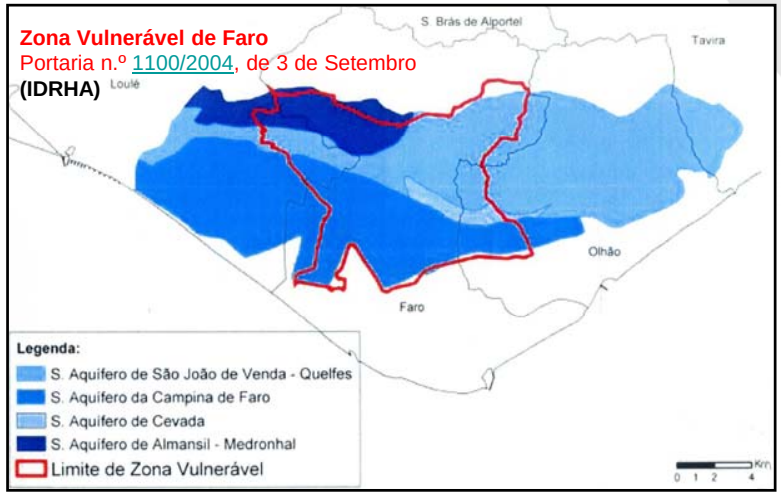
> Concentrações elevadas de nitratos detectadas nas águas subterrâneas, desde o início da década de 90, causadas por fontes poluentes difusas associadas à agricultura.

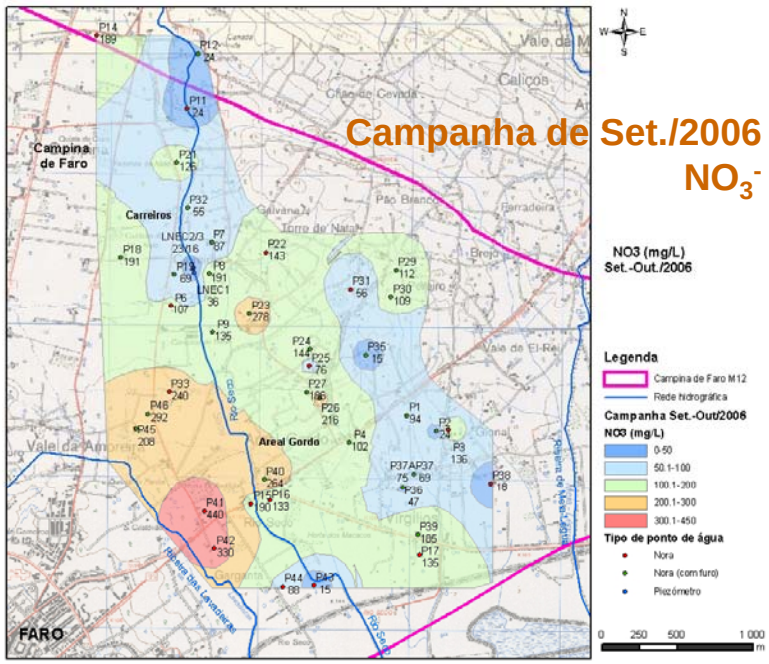
> Sistema aquífero da Campina de Faro integra a **Zona Vulnerável de Faro** pela aplicação da Directiva dos Nitratos *(desde 1997 pela Portaria n.º 1037/97, revogada em 2004 pela Portaria n.º 1100/2004)*

Objectivo da aplicação de metodologias de RECARGA ARTIFICIAL:

> Optimização da reabilitação do aquífero superficial da Campina de Faro através da aplicação de metodologias de RA e recorrendo a fontes de água alternativas,

> Minimizar os efeitos da poluição difusa – cumprimento da Directiva-Quadro da Água de atingir "o bom estado de qualidade" até 2015.





© LNEC 2006

3) Sistema de recarga artificial em Carreiros

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

METODOLOGIA:

Sistema de recarga artificial composto por duas **bacias de infiltração**, construídas no leito do rio Seco e preenchidas até à superfície por cascalho grosseiro, que facilitam a infiltração natural do escoamento superficial.

Fonte de água para a recarga – escoamento superficial do rio

Monitorização dos aquíferos superficial freático e confinado – 3 piezómetros

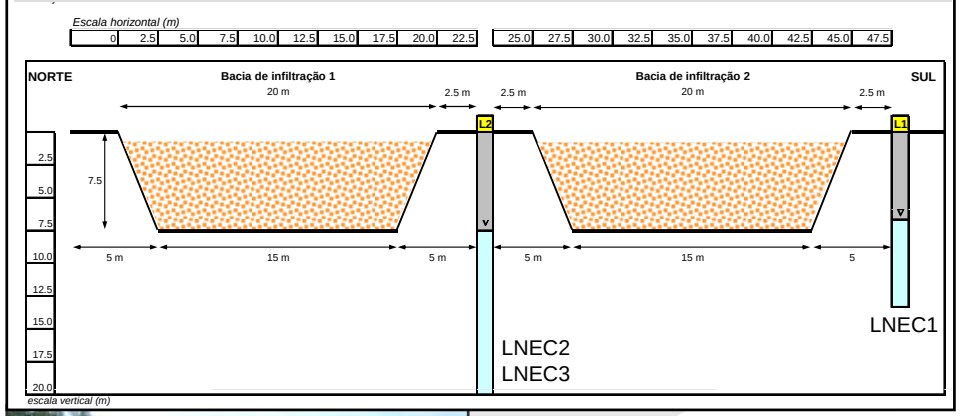
OBJECTIVOS:

1) Avaliar a eficiência deste tipo de estruturas para facilitar a infiltração da água do rio

2) Determinar os seus efeitos no aquífero superficial/confinado em termos de quantidade e qualidade da água.

3) Ensaio de recarga artificial seguido de um ensaio de traçador, de forma a estimar taxas de infiltração e velocidades de escoamento subterrâneo.

Bacias de infiltração (Dez. 2006 – Set. 2007)



Características das bacias:
Aquífero arenoso superficial
Dimensões: 20m (C) x 5m (L) x 5m (P)
Área = 100 m^2 Volume = 2 x 363 m^3
Equipamento de monitorização:
3 sondas multiparamétricas Troll9500
2 Limnígrafos pneumáticos

© LNEC 2006

3a) Cenários monitorizados

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

Ensaios de recarga natural

✓ Monitorização contínua da infiltração do escoamento superficial do rio nos piezómetros

Períodos estudados:

a) Período da estação húmida (Outubro/2006 a Março/2007)

b) Período da estação seca (Abril a Setembro/2007)

Ensaios de recarga artificial com traçador salino

✓ Monitorização contínua da recarga artificial nos piezómetros (qualidade/quantidade)

✓ Aplicação de **métodos geofísicos de resistividade eléctrica**, para detecção e acompanhamento ao longo do tempo do traçador salino.

Maio/2007

© LNEC 2006

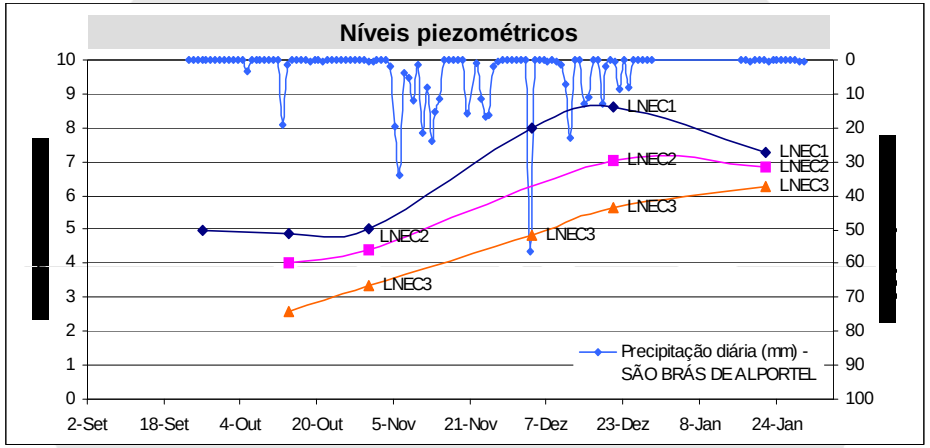
3b) Resultados obtidos (1)

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

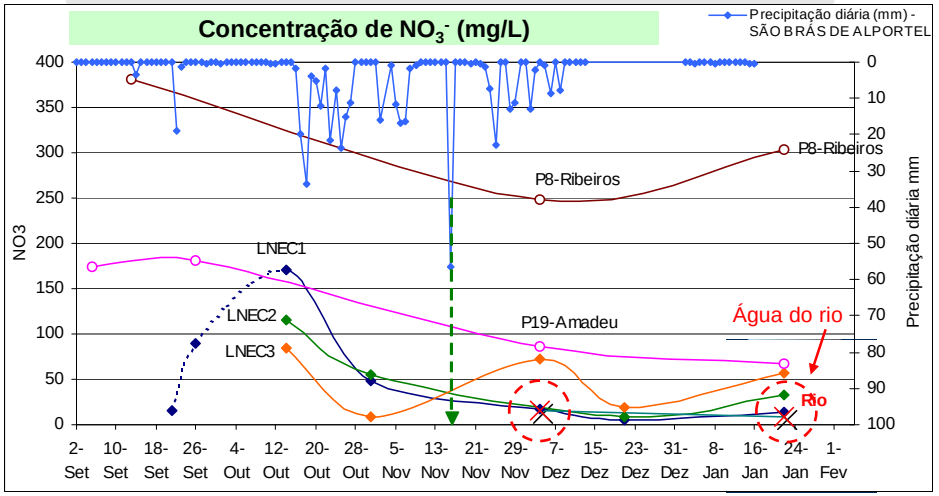
Ensaios de recarga natural

Período da estação húmida

✓ Níveis piezométricos tendem a sofrer uma elevação durante os meses de precipitação intensa de Novembro e Dezembro, quando o escoamento superficial no rio se infiltra nas bacias.



✓ Concentrações de NO_3^- decrescem consideravelmente no mesmo período e tendem a aproximar-se dos valores medidos nas amostras de água do rio, especialmente no caso dos piezómetros abertos no aquífero superficial.



Estes resultados assinalam uma ocorrência relevante para o objectivo principal da investigação, relativamente à contribuição para a reabilitação da qualidade da água no aquífero superficial da Campina de Faro.

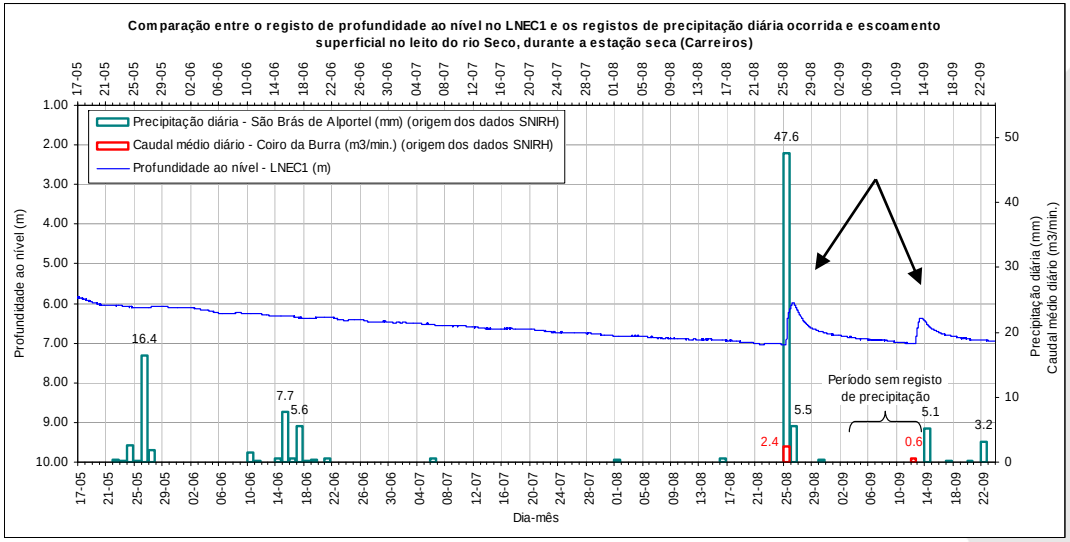
© LNEC 2006

3b) Resultados obtidos (2)

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

Ensaios de recarga natural

Período da estação seca

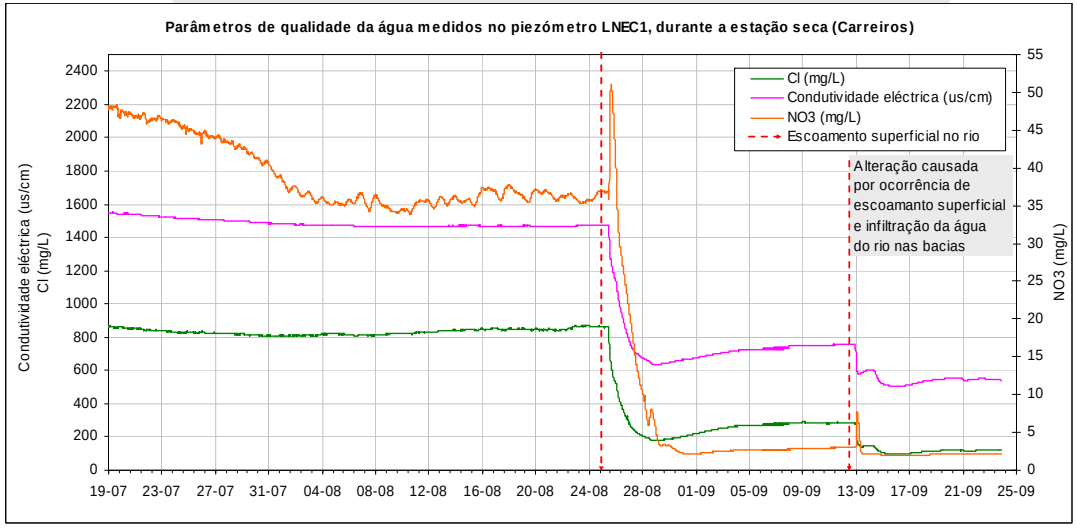


Ocorrência de 2 eventos de precipitação consideráveis e pouco comuns no Verão, no fim da estação seca:

- ✓ 53 mm 25-26/08 e 5 mm 14/09

provocou a ocorrência de dois episódios isolados de escoamento no rio e a infiltração de água do rio na zona das bacias de Carreiros.

Mais uma vez se detectou uma melhoria da qualidade da água, causada pela infiltração da água do rio nas bacias durante o primeiro evento de cheia no rio Seco do ano hidrológico de 2007.



© LNEC 2006

4) Ensaios de recarga artificial com um traçador salino

Ensaios de recarga artificial com traçador salino

Maio/2007

METODOLOGIA:

✓ Ensaio de recarga artificial seguido de um ensaio de traçador na bacia de infiltração localizada a sul.

✓ Duração total dos ensaios = 7 dias

✓ Fonte de água - aquífero profundo, através da extracção de água realizada no furo LNEC3.

✓ Traçador utilizado - 500 kg de NaCl

Qinicial = 22 m^3/h
Qcontante = 5 m^3/h
Altura água bacia_max. = 20 cm

✓ Enchimento da bacia interrompia-se durante a noite

Bacia Sul - antes e durante a realização do ensaio de recarga artificial…

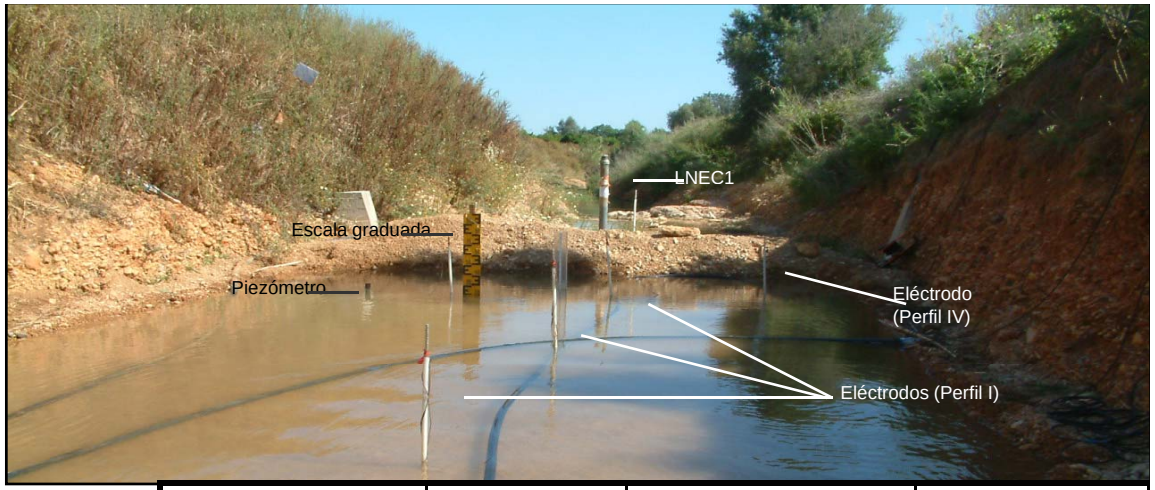
… durante a colocação do traçador (NaCl)

✓monitorização contínua (nível piezométrico e parâmetros de qualidade da água)

© LNEC 2006

4a) Resultados obtidos (1)

Ensaios de recarga artificial com traçador salino



Dias	Tempo (h)	Carga hidráulica (m) (1)	Taxa de infiltração média (m/d)
03 a 04 e 07 a 11 Maio	12,6	variável (de 4.69 a 3,54)	1,81
04 a 07 Maio	63	variável (de 4.58 a 0,90)	1,36
11 a 18 Maio	168	variável (de 4.71 a 0)	0,66

Estimativa de parâmetros hidráulicos in situ:

Taxas de infiltração

Valor médio = 1,28 m/d
Valor máx. = 1,81 m/d
(variável com a carga hidráulica existente)

Porosidade total do material de enchimento da bacia (n)

n = Vt/Vv

Valor médio medido *in situ* n = 0,40

Valor medido em laboratório n = 0,41

Dia do ensaio	Vt (área 67 m^2) (m^3)	Vv (m^3)	n2
3 Maio	304	117	0,39
4 Maio	67	28	0,41
7 Maio	253	95	0,38
8 Maio	62	28	0,44
9 Maio	70	28	0,40
Média			0,40

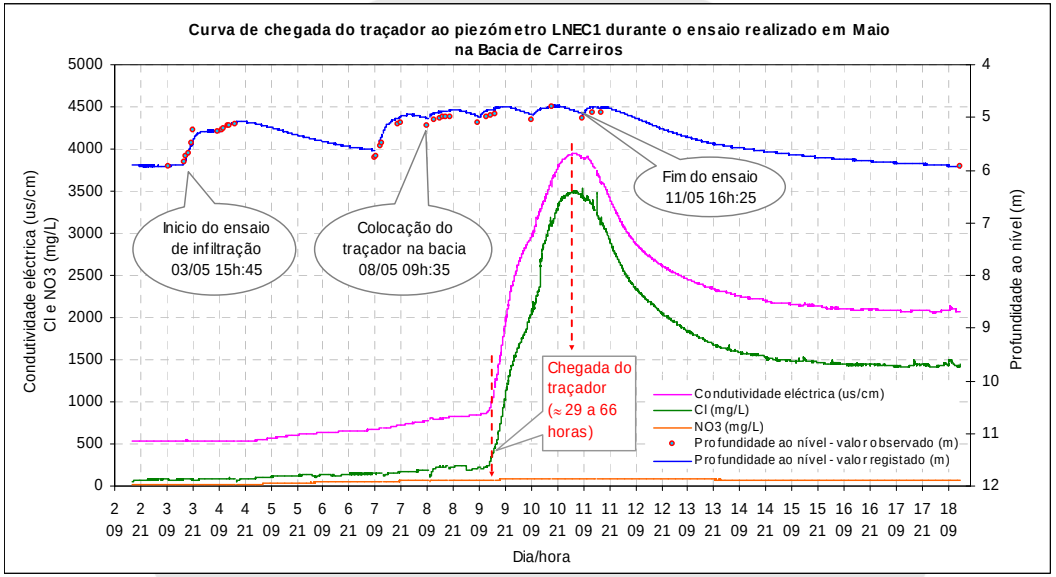
Vt (67 m^2 área) = Volume da bacia, considerando a estimativa da área da bacia de 67 m^2 e o valor registado de profundidade ao nível no pequeno piezómetro.
Vv = Volume de água colocado na bacia desde o início do enchimento até atingir a superfície do solo (considerando Q=22 m^3/h).
n2 = Vv/Vt = Porosidade estimada considerando a área da bacia calculada de 67 m^2.

© LNEC 2006

4a) Resultados obtidos (2)

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

Ensaios de recarga artificial com traçador salino



Curva de chegada do NaCl ao LNEC1

Estimativa de parâmetros hidráulicos

Tempo total de percurso = 66 h
Distância percorrida = 7,5 m

Velocidade intersticial V_i = 2,73 m/d

Velocidade de Darcy

$$V_D = V_i \times n_e$$

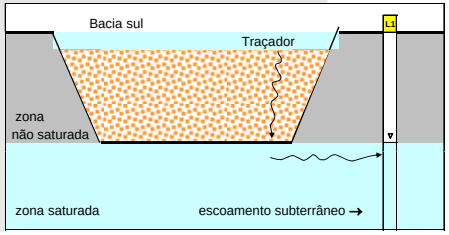
n_e = porosidade eficaz

V_D _ bacia subterrânea = 1,12 m/d (sendo n_e= 41%)
V_D _ zona saturada = 0,96 m/d (sendo n_e= 35%)

Permeabilidade

$$k = V_D / i = 2{,}82 \text{ m/d}$$

Gradiente hidráulico i = 0,34



✓ Valores calculados correspondem ao escoamento influenciado, por efeito de um ensaio de recarga artificial e não ao escoamento natural, estando por este motivo sobrestimados em relação aos valores reais.

© LNEC 2006

5) Aplicação de métodos geofísicos de resistividade eléctrica

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

OBJECTIVO:

✓ Determinar o sentido de escoamento subterrâneo na zona circundante das bacias de infiltração, através da detecção e acompanhamento ao longo do tempo do traçador salino.

METODOLOGIA:

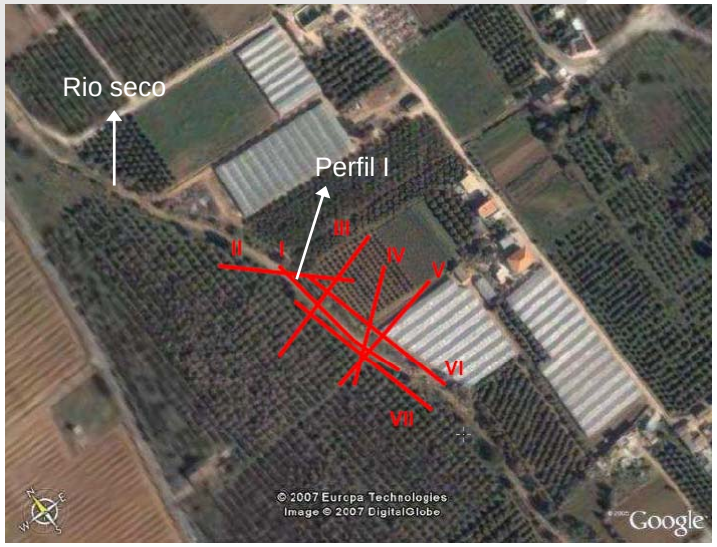
✓ Realização de vários perfis de resistividade eléctrica (dispositivo Dipolo-Dipolo):
- 3 longitudinais e 4 transversais ao leito do rio

✓ Caracterização da situação de referência, antes da realização do ensaio de infiltração

✓ Selecção do perfil longitudinal, ao longo do leito do rio, que atravessa as duas bacias (Perfil I), para se proceder à repetição da leitura em intervalos de tempo consecutivos - cerca de 12 horas - durante o ensaio de traçador.

✓ Obtenção das tomografias geoeléctricas
(programa Res2Dinv v3.51)

✓ Análise das tomografias resultantes



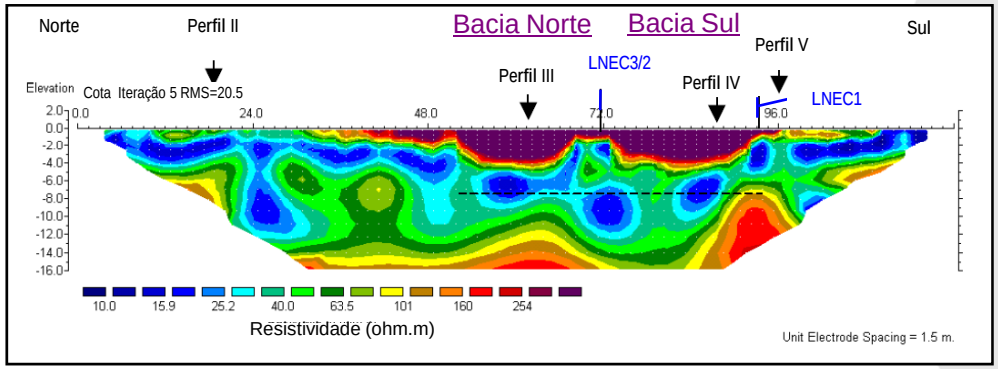
Caracterização do perfil de resist. elect.:
Comp. = 120 m
Distância dipolar = 3 m
Prof. máx. investigação = 16 m

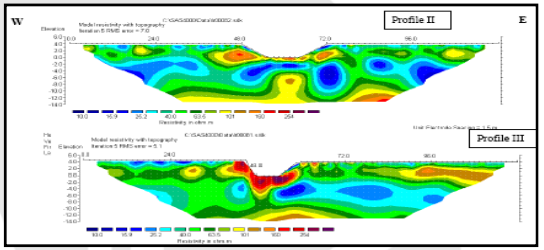
© LNEC 2006

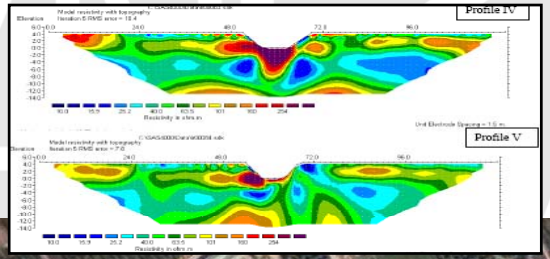
5) Aplicação de métodos geofísicos de resistividade eléctrica

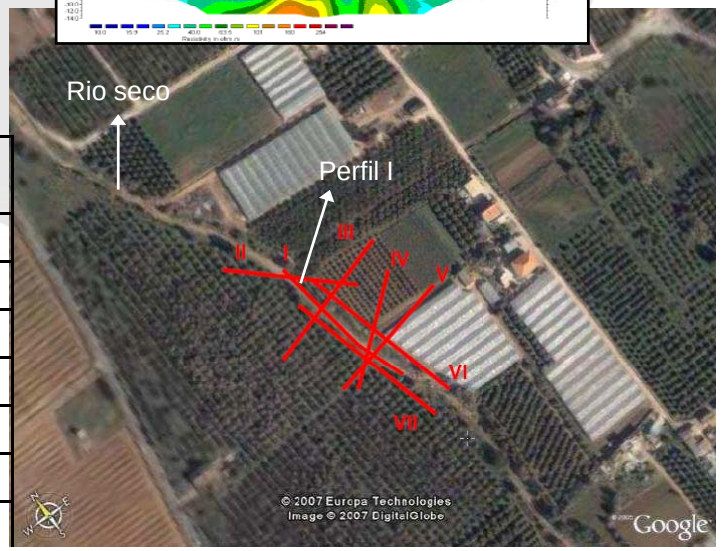
LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

- ✓ Modelo de resistividade eléctrica obtido para o Perfil I, correspondente à situação de referência
- ✓ Localização dos piezómetros LNEC e de outros perfis de resistividade que cruzam este alinhamento N-S.





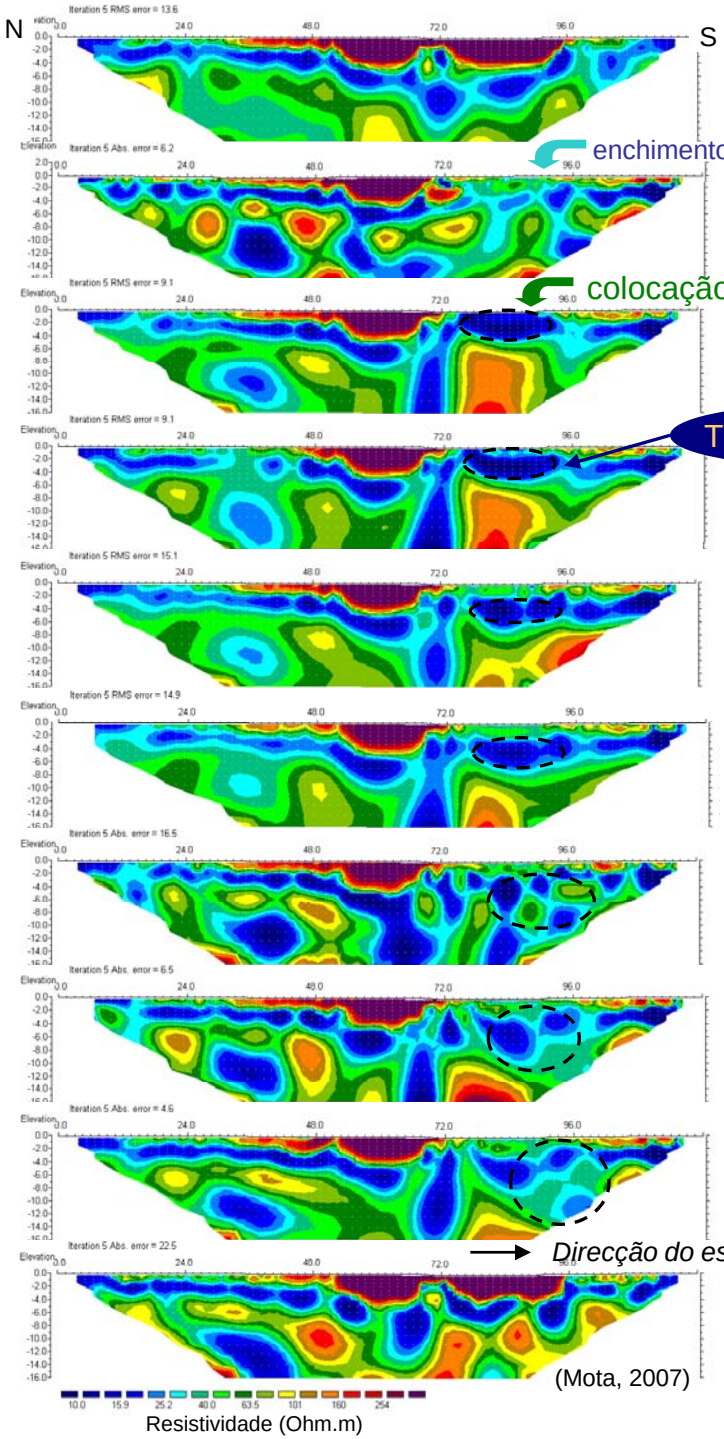




Perfil de resistividade eléctrica	Alinhamento	Localização
Perfil I	NNW-SSE	Longitudinal, ao longo do leito do rio
Perfil II	NW-SE	Transversal ao leito do rio, a montante das bacias
Perfil III	ENE-WSW	Transversal ao leito do rio, intersecta a bacia Norte
Perfil IV	NE-SW	Transversal ao leito do rio, intersecta a bacia Sul
Perfil V	ENE-WSW	Transversal ao leito do rio, intersecta o piezómetro LNEC1
Perfil VI	NNW-SSE	Longitudinal, margem esquerda
Perfil VII	NNW-SSE	Longitudinal, margem direita

© LNEC 2006

Modelos de resistividade eléctrica obtidos no Perfil I antes, durante e após o ensaio de traçador



(Mota, 2007)

02/Maio
(situação de referência antes do enchimento da bacia)

07/Maio
(situação de referência com a bacia saturada, no dia anterior ao do ensaio)

08/Maio 10h:55
(1,5 h após a colocação do traçador com a bacia saturada)

08/Maio 17h:15
(7,8 h após a colocação do traçador)

09/Maio 8h:30
(23 h após a colocação do traçador)

09/Maio 16h:31
(31 h após a colocação do traçador)

11/Maio 14h:00
(77 h após a colocação do traçador)

10/Maio 8h:35
(45 h após a colocação do traçador)

10/Maio 17h:00
(56 h após a colocação do traçador)

18/Maio
(240 h, 10 dias após a colocação do traçador)

5) Aplicação de métodos geofísicos de resistividade eléctrica

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

(Mota, 2007 e Mota *et al*., 2008)

Análise das tomografias eléctricas:

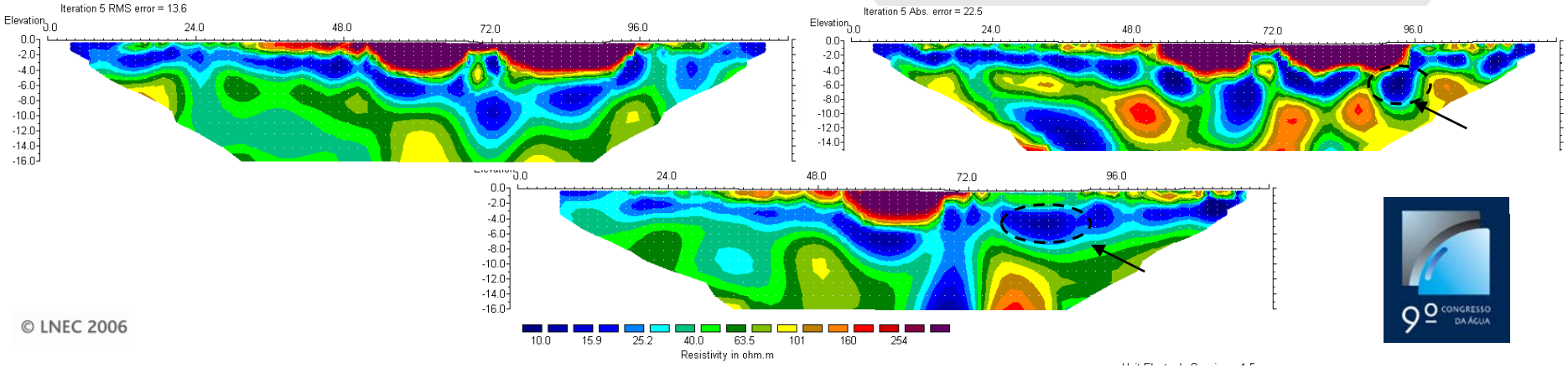
✓ Clara identificação das bacias de infiltração e da sua geometria, caracterizadas por uma anomalia de elevada resistividade eléctrica, devido à presença de vazios;

✓ A saturação da bacia sul transformou esta anomalia numa outra de baixa resistividade, devido à presença de água nos vazios entre o cascalho;

✓ Deslocação de uma anomalia de baixa resistividade eléctrica, localizada entre as coordenadas 75 e 93 do Perfil I de 7 de Maio para uma anomalia menor, em torno da coordenada 96 a 18 de Maio. Esta anomalia é devida à presença do traçador salino, e desloca-se de norte para sul e em profundidade;

✓ Identificação de uma anomalia vertical de baixa resistividade no Perfil I (coordenada 72), a qual se correlaciona com o fluxo de água provocado pela bombagem, entre os dias 8 e 11 de Maio, mais evidente após extracção superior a 24 h (após 3 de Maio);

✓ Após sete dias desde o início do ensaio, a bacia sul retoma a configuração da situação de referência. Contudo não foi possível, pela análise geofísica, determinar o momento exacto desta ocorrência, o que daria uma indicação da taxa de infiltração das formações subjacentes à bacia.



© LNEC 2006

6) Conclusões

✓ Diversos ensaios de recarga artificial foram realizados no âmbito do Projecto Gabardine no aquífero superficial da Campina de Faro.

✓ Seleccionaram-se as experiências realizadas no caso de estudo de Carreiros, em duas bacias de infiltração construídas numa secção do rio Seco que promovem a infiltração da água do rio.

✓ Este tipo de estruturas podem constituir uma forma viável de contribuição para a reabilitação da qualidade da água no aquífero superficial da Campina de Faro, através da recarga artificial do escoamento superficial do rio, que constitui assim uma importante fonte de água alternativa para a recarga.

✓ Complementarmente foi realizado um ensaio de traçador numa das bacias de infiltração, que permitiu estimar uma boa eficiência da estrutura de recarga, em termos de taxas de infiltração. Possibilitou também a estimativa de parâmetros hidráulicos como velocidades de escoamento e permeabilidade das formações do aquífero.

✓ A detecção da pluma salina pelo método de resistividade eléctrica apresenta uma relação favorável comparativamente com os registos da monitorização das águas subterrâneas, permitindo assinalar a sua migração espacial e temporal, durante a realização do ensaio de traçador na bacia.

✓ O objectivo dos ensaios realizados consistiu em determinar a aplicabilidade das diferentes metodologias de recarga artificial de aquíferos de forma que os resultados obtidos possam contribuir para a elaboração de um modelo de escoamento subterrâneo e de transporte que incorpore vários cenários de reabilitação do aquífero com recurso à recarga artificial. Por fim, a incorporação de um sistema de apoio à decisão permitirá a selecção das técnicas mais adequadas em função da maximização da melhoria da qualidade da água e minimização dos custos totais.

© LNEC 2006

7) Agradecimentos

✓ Projecto GABARDINE

no âmbito do 6º Programa-Quadro de Investigação da União Europeia

✓ Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) e Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) no âmbito de uma Bolsa de Doutoramento

Obrigado pela vossa atenção

© LNEC 2006