



Hinc patriam sustinet

**Instituto Superior de Agronomia  
Universidade Técnica de Lisboa**

# **Dinâmica do Azoto em Campos Alagados para Produção de Arroz, em Salvaterra de Magos**

## **Eficiência do Uso do Nutriente pela Cultura**

**Nuno Miguel Ramos Figueiredo**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

**Engenharia Agronómica**

Orientadora: Inv.<sup>a</sup> Auxiliar com Habilitação Corina Luísa Videira de Abreu Fernandes  
Carranca

Co-orientadora: Prof.<sup>a</sup> Catedrática Amarilis Paula Alberti de Varennes e Mendonça

### **Júri:**

Presidente: Dr.<sup>a</sup> Cristina Maria Moniz Simões de Oliveira, Professora Associada do Instituto  
Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa

Vogais: Dr.<sup>a</sup> Amarilis Paula Alberti de Varennes e Mendonça, Professora Catedrática do  
Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa

Dr.<sup>a</sup> Cláudia Saramago de Carvalho Marques dos Santos Cordovil, Professora  
Auxiliar do Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa

Dr.<sup>a</sup> Corina Luísa Videira de Abreu Fernandes Carranca Inv.<sup>a</sup> Auxiliar com  
Habilitação do Instituto Nacional de Recursos Biológicos, I.P.

Dr. Filipe Miguel Sequeira Ramos Rodrigues Pedra, Investigador Auxiliar do Instituto  
Nacional de Recursos Biológicos, I.P.

*Escrito ao abrigo do novo Acordo Ortográfico*

## **Agradecimentos**

Este trabalho não teria sido concluído sem a ajuda de várias pessoas que, diretamente ou indiretamente, contribuíram para a sua realização. Por esse motivo não poderia deixar de expressar e registar aqui os meus sinceros agradecimentos:

Em primeiro lugar um agradecimento especial para a minha orientadora, Doutora Corina Carranca. Sem ela, este trabalho não teria sido possível concretizar. Agradeço a confiança que depositou em mim, assim como a sua pronta disponibilidade manifestada para a orientação deste trabalho, os ensinamentos, o permanente incentivo e encorajamento, a inestimável ajuda e paciência, assim como todas as suas preciosas críticas e sugestões, tudo isto levado a cabo com o seu admirável rigor e notável profissionalismo.

Gostaria de expressar o meu agradecimento de uma forma muito especial, à minha co-orientadora Professora Catedrática Amarílis Paula Alberti de Varennes e Mendonça, por ter aceite o convite para co-orientação desta tese, disponibilidade apresentada, apoio na sua elaboração e revisão crítica da tese.

Um agradecimento ao Instituto Superior de Agronomia (ISA), pela admissão no Mestrado, bem como a análise de caracterização das argilas.

Este trabalho apenas foi possível devido ao financiamento numa Bolsa de Investigação da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), através do projeto PTDC/AGR-AAM/102529/2008 “Emissões gasosas medidas em campos regados de arroz produzido em dois solos diferentes, em Portugal, por efeito das práticas culturais, do clima e do aumento da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera”. Agradeço o seu financiamento.

Agradeço ao Instituto Nacional de Recursos Biológicos (INRB, IP) por me ter possibilitado desenvolver o meu trabalho de Mestrado. Agradeço à Doutora Ângela Prazeres do INRB, IP, pela sua ajuda na determinação analítica do azoto inorgânico.

Não poderia de deixar de agradecer a todos os colaboradores da Unidade de Ambiente e Recursos Naturais, em particular, o ex-Laboratório Químico Agrícola Rebelo da Silva (LQARS), o seu afetuoso acolhimento e ensinamentos durante o período que me encontrei neste laboratório, assim como a sua amizade. Tenho de agradecer às pessoas que me permitiram trabalhar neste Laboratório, a Assistente de Investigação Eng.<sup>a</sup> Raquel Macedo Soveral Dias Mano, às Técnicas Superiores Eng.<sup>a</sup> Lídia Maria Tavares Farropas e Eng.<sup>a</sup> Rosa Catarina Monteiro Maricato e à Técnica Profissional de Laboratório Adozinda Ribeiro Carreiro Curto, responsáveis por diferentes setores do laboratório. O meu obrigado ao Dr. Filipe Miguel Sequeira Ramos Rodrigues Pedra pelos ensinamentos sobre o algoritmo para determinação do N potencialmente mineralizável.

Um agradecimento à Eng.<sup>a</sup> Paula Marques do Centro Operativo e Tecnológico do Arroz (COTArroz), pela sua amizade, ajuda e esclarecimento de algumas dúvidas, bem como a disponibilidade das parcelas para realização do estudo. Também pertencente a este Centro e ao

INRB, IP, um agradecimento ao Eng.º Alberto Vargues, pela sua amizade e colaboração neste estudo.

Ao Dr. Eugene Hettel do International Rice Research Institute (IRRI), agradeço a autorização para publicação das fotografias incluídas na Fig. 5 deste trabalho.

A todas as pessoas e amigos que sempre me incentivaram e apoiaram para atingir o máximo possível, também deixo o meu muito obrigado.

Por último, mas não menos importante um agradecimento aos meus pais e meu irmão. Para os meus pais é difícil encontrar as palavras necessárias para expressar o meu sentimento de gratidão e admiração por tudo o que fizeram e fazem por mim e meu irmão. Porque lhes devo a minha vida, e tudo aquilo que sou, por serem a minha força, pelo amor e confiança, por serem os melhores pais do mundo, por tudo isto e muito mais, o meu reconhecimento e agradecimento. Ao meu irmão pela sua amizade sem igual, pelo seu apoio e constante incentivo, o meu obrigado.

A todos o meu obrigado...

## Resumo

Portugal é o maior consumidor *per capita* e o quarto maior produtor europeu de arroz, contribuindo para uma produção total de 5,3%. O cultivo desta planta na Europa, e em Portugal, em particular, é realizado por alagamento. As condições de anaerobiose verificadas nos solos influenciam a gestão dos nutrientes, principalmente o azoto (N). O azoto fornecido à cultura é parcialmente perdido para fora do ecossistema solo-planta por volatilização do amoníaco, desnitrificação e lixiviação. Para uma utilização eficiente do nutriente, é fundamental perceber a dinâmica do N no solo e conhecer as necessidades azotadas de cada cultivar. Com este trabalho estudou-se a evolução dos teores de  $N_{\text{inorgânico}}$ , em duas parcelas em dois solos com características semelhantes com resíduos incorporados, ao longo do ciclo do arroz (*Oryza sativa* L. cv. Ariete), produzido por alagamento, na região de Salvaterra de Magos, bem como o  $N_{\text{orgânico}}$  potencialmente mineralizável em condições aeróbias e anaeróbias. Observaram-se decréscimos nos teores de  $N_{\text{inorgânico}}$  nos solos, com os nitratos significativamente inferiores ao azoto amoniacal. A produção de arroz não diferiu em ambas as parcelas de terreno ( $5,6 \text{ t ha}^{-1}$ ), nem da média nacional. A eficiência de recuperação do N na planta foi de 92%, e de 53% no grão.

Palavra-chave: dinâmica do N no solo, eficiência de utilização do N, imobilização do N, mineralização potencial do N, perdas de N.

## **Abstract**

Portugal is the fourth largest European rice producer, contributing with a production of 5.3% of the total and is the first *per capita* consumer. The cultivation of this crop in Europe, particularly in Portugal, is mainly by flooding. The anaerobic condition in these soils influences nutrients management, mainly the nitrogen (N). The nitrogen requirements of rice crop are derived from both the soil and fertilizers. The applied N to this crop is partially lost by different ways, including ammonia volatilization, denitrification, and leaching. For the optimum N use efficiency by the crop it is relevant to understand the N dynamics in the soil. In this work, we studied the evolution of inorganic N in two amended soils (A and B), during the rice (*Oryza sativa* L. 'Ariete') growth, in 2010. Rice was produced by flooding, in Salvaterra de Magos (central Portugal). We also estimated the potentially mineralizable N under aerobic and anaerobic incubations. The inorganic-N decreased significantly at harvest in both soils, with greater values of ammonium during the growth cycle, compared to nitrate levels. Crop yield (5.6 t ha<sup>-1</sup>) did not differ between soils and the Portuguese average. Crop N recovery was 92%, and 53% in the grain.

Keywords: N immobilization, N losses, N use efficiency, potential N mineralization, soil N dynamics.

## Extended Abstract

Rice is one the most important food crops in the world and staple for more than half of the global population. Portugal is the fourth largest European producer of rice, contributing to the 5.3% of the total production, and is the first consumer. The cultivation of this crop in Europe, and Portugal in particular, is mainly by flooding. The rice is established by direct wet seeding or direct dry seeding in the field. The continuous flooding help to control soil temperature, weeds and pests.

The application of nitrogen (N) fertilizers in this crop is high, because N is the nutrient that most limits rice production. Inappropriate N management has harmful effects on crop yield and the environment. N fertilizer applied to rice can be lost by different mechanisms, including ammonia volatilization, denitrification, and leaching. These losses jointly with leaching and runoff contribute for low N use efficiency. Flooded soils have different characteristics from well-drained soils, which affect the nutrient dynamics in the soil.

For the crop N use efficiency it is relevant to understand the N dynamics in the soil. In this work, we studied the evolution of inorganic N in two amended soils (A and B), during the rice (*Oryza sativa* L. 'Ariete') growth, in 2010. Rice was produced by flooding, in Salvaterra de Magos (central Portugal). We also estimated the potentially mineralizable N under aerobic and anaerobic incubations, and the crop N response.

The inorganic-N decreased significantly at harvest in both soils, with greater values of ammonium during the growth cycle, compared to nitrate levels.

The potential N mineralization rate under aerobic and anaerobic incubation revealed little or no mineral N available to plants, in the critical phase of tillering, but under anaerobic conditions some N was nitrified after 5 days of incubation (and residue incorporation) at 0 – 7.5 cm depth (the aerobic layer) of soil B. The aerobic incubation showed an N loss from the system, but soil A also showed some N immobilization either after 5 or 30 days incubation, at both 0 – 7.5 cm and 7.5 – 15 cm layers. The soil A presented a higher silt and clay fraction compared to soil B, and greater clay minerals of the type 2:1.

The kinetic equation ("Levenberg-Marquardt") applied to the inorganic-N produced during both incubations showed a fast decomposition constant rate ( $k=0.27$ ) for the whole data.

Plant production ( $5.6 \text{ t ha}^{-1}$ ) didn't differ between soils, and from the average Portuguese yield. Greater N was measured in the grain ( $11 \text{ g N kg}^{-1}$ ) compared to the other plant organs. Total N in the plant ( $110.5 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) showed a great plant N use efficiency (88 - 96%) which does not seen reasonable. Most literature reported values of 20 – 60% for N use by waterlogged rice. The high exported N in the present study can be due to the soil N residue, N in the irrigation water and the asymbiotic  $\text{N}_2$  fixed by cyanobacteria and release of "fixed"  $\text{NH}_4^+$ . Crop N recovery was 92%, and 53% in the grain. The physiological agronomic efficiency (53%) was equal to the Harvest Index (53%). SPAD-values indicated a good plant N status. A significant regression line for the whole growth cycle was obtained for both soils ( $y=30.92x^{0.166}$ ,  $R^2=0.95$ ,  $n=450$ ).

Keywords: N immobilization, N losses, nitrogen use efficiency, potential nitrogen mineralization, soil N dynamics.

## Índice

|   |            |
|---|------------|
| <b>Agradecimentos .....</b>   | <b>i</b>   |
| <b>Resumo.....</b>  | <b>iii</b> |
| <b>Abstract.....</b>  | <b>iv</b>  |
| <b>Extended Abstract.....</b>   | <b>v</b>   |
| <b>Índice .....</b>   | <b>vi</b>  |
| <b>Lista de Quadros .....</b>   | <b>x</b>   |
| <b>Lista de Figuras .....</b>   | <b>xi</b>  |
| <b>Lista de Abreviaturas .....</b>  | <b>xii</b> |
| <b>1. Introdução.....</b>   | <b>1</b>   |
| <b>2. Revisão bibliográfica .....</b>   | <b>3</b>   |
| <b>2.1. Importância da cultura do arroz.....</b>                                    | <b>3</b>   |
| <b>2.1.1. No mundo .....</b>  | <b>3</b>   |
| <b>2.1.2. Em Portugal .....</b>   | <b>6</b>   |
| <b>2.1.3. Sistemas de cultivo do arroz .....</b>                                    | <b>8</b>   |
| <b>2.2. Principais fatores edafo-climáticos que afetam a cultura do arroz .....</b> | <b>8</b>   |
| <b>2.2.1. Solo .....</b>  | <b>9</b>   |
| <b>2.2.2. Clima .....</b>   | <b>10</b>  |
| <b>2.2.2.1. Temperatura.....</b>  | <b>10</b>  |
| <b>2.2.2.2. Radiação solar .....</b>  | <b>12</b>  |
| <b>2.2.3. Água .....</b>  | <b>12</b>  |
| <b>2.3. Azoto: o principal nutriente na cultura do arroz .....</b>                  | <b>13</b>  |
| <b>2.3.1. Dinâmica do N nos arrozais .....</b>                                      | <b>14</b>  |

|                 |  |           |
|-----------------|--|-----------|
| <b>2.3.2.</b>   | <b>Fertilização azotada</b> .....  | <b>16</b> |
| <b>2.3.2.1.</b> | <b>Fontes azotadas na cultura do arroz por alagamento</b> .....                  | <b>17</b> |
| <b>2.3.2.2.</b> | <b>Épocas de aplicação dos fertilizantes azotados</b> .....                      | <b>18</b> |
| <b>3.</b>       | <b>Material e Métodos</b> .....  | <b>20</b> |
| <b>3.1.</b>     | <b>Localização dos ensaios</b> .....   | <b>20</b> |
| <b>3.1.1.</b>   | <b>Delineamento experimental</b> .....   | <b>20</b> |
| <b>3.1.2.</b>   | <b>Caracterização climática e edáfica</b> .....                                  | <b>20</b> |
| <b>3.1.2.1.</b> | <b>Clima</b> .....   | <b>20</b> |
| <b>3.1.2.2.</b> | <b>Solo</b> .....  | <b>22</b> |
| <b>3.2.</b>     | <b>Operações culturais</b> .....   | <b>23</b> |
| <b>3.2.1.</b>   | <b>Mobilização do solo</b> .....   | <b>24</b> |
| <b>3.2.2.</b>   | <b>Sementeira</b> .....  | <b>24</b> |
| <b>3.2.3.</b>   | <b>Rega</b> .....  | <b>25</b> |
| <b>3.2.3.1.</b> | <b>Fertilização</b> .....  | <b>25</b> |
| <b>3.2.4.</b>   | <b>Proteção fitossanitária</b> .....   | <b>26</b> |
| <b>3.3.</b>     | <b>Colheita de amostras de terra, água e material vegetal</b> .....              | <b>26</b> |
| <b>3.3.1.</b>   | <b>Colheita das amostras de terra</b> .....                                      | <b>26</b> |
| <b>3.3.2.</b>   | <b>Colheita de amostras de água</b> .....  | <b>28</b> |
| <b>3.3.3.</b>   | <b>Medições SPAD e colheita de amostras de material vegetal</b> .....            | <b>29</b> |
| <b>3.4.</b>     | <b>Métodos laboratoriais</b> .....   | <b>30</b> |
| <b>3.4.1.</b>   | <b>Análise física, química e mineralógica das amostras de terra e água</b> ..... | <b>30</b> |
| <b>3.4.1.1.</b> | <b>Análise textural do solo</b> .....  | <b>30</b> |
| <b>3.4.1.2.</b> | <b>Caracterização das argilas</b> .....  | <b>30</b> |
| <b>3.4.1.3.</b> | <b>pH<sub>(H2O)</sub> do solo e água</b> .....                                   | <b>30</b> |

|            |  |    |
|------------|--|----|
| 3.4.1.4.   | Condutividade elétrica (CE) na água.....   | 31 |
| 3.4.1.5.   | Azoto inorgânico ( $N_{\text{inorgânico}}$ ) no solo e água.....   | 31 |
| 3.4.1.6.   | Azoto total ( $N_{\text{total}}$ ) no solo .....   | 31 |
| 3.4.1.7.   | Carbono total ( $C_{\text{total}}$ ), carbono orgânico ( $C_{\text{orgânico}}$ ) e matéria orgânica no solo..... | 31 |
| 3.4.1.8.   | $Ca^{2+}$ , $Mg^{2+}$ , $K^+$ e $Na^+$ no solo (bases de troca) e na água .....                                  | 32 |
| 3.4.1.9.   | Cloretos ( $Cl^-$ ) na água .....  | 32 |
| 3.4.1.10.  | Capacidade de troca catiónica (CTC).....   | 32 |
| 3.4.1.11.  | Mineralização potencial do $N_{\text{orgânico}}$ do solo melhorado com resíduos vegetais.....                    | 32 |
| 3.4.2.     | Análise física e química do material vegetal.....  | 33 |
| 3.4.2.1.   | Leituras SPAD.....   | 33 |
| 3.4.2.2.   | Produtividade.....   | 33 |
| 3.4.2.3.   | Concentração e exportação de N .....   | 33 |
| 3.5.       | Análise estatística dos resultados.....  | 33 |
| 4.         | Resultados e Discussão .....   | 35 |
| 4.1.       | Solo .....   | 35 |
| 4.1.1.     | Dinâmica do $N_{\text{inorgânico}}$ nos solos ( $N-NH_4^+ + N-NO_3^-$ ), durante o ciclo do arroz .....          | 35 |
| 4.1.1.1.   | Dinâmica do azoto amoniacal N ( $N-NH_4^+$ ) nos solos cultivados com arroz .....                                | 36 |
| 4.1.1.2.   | Dinâmica do azoto nítrico ( $N-NO_3^-$ ) nos solos cultivados com arroz.....                                     | 38 |
| 4.1.1.3.   | Mineralização potencial do N nos solos .....   | 40 |
| 4.1.1.3.1. | Incubação aeróbia .....  | 40 |
| 4.1.1.3.2. | Incubação anaeróbia.....   | 41 |
| 4.2.       | Lâmina de água.....  | 44 |
| 4.2.1.     | Composição físico-química da lâmina de água, durante o ciclo do arroz.....                                       | 44 |
| 4.3.       | Material vegetal.....  | 46 |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>4.3.1. Produtividade .....</b>  | <b>46</b> |
| <b>4.3.2. Teor de N no material vegetal .....</b>  | <b>48</b> |
| <b>4.3.2.1. Leituras SPAD.....</b>   | <b>48</b> |
| <b>4.3.2.2. Teor de <math>N_{total}</math> (<math>g\ kg^{-1}</math> MS) e <math>N_{exportado}</math> (<math>kg\ N\ ha^{-1}</math>) na planta .....</b> | <b>49</b> |
| <b>5. Conclusões .....</b>   | <b>52</b> |
| <b>6. Bibliografia.....</b>  | <b>53</b> |

## Lista de Quadros

|   |    |
|---|----|
| Quadro 1. Principais países produtores de arroz, áreas de produção e produtividade (2009)   | 4  |
| Quadro 2. Características químicas do arroz cru por 100 g de matéria seca   | 5  |
| Quadro 3. Área, produtividade e produção de arroz em Portugal (2009)  | 6  |
| Quadro 4. Características para classificação comercial do arroz em Portugal   | 7  |
| Quadro 5. Temperaturas ótimas e críticas (°C) para a planta do arroz  | 12 |
| Quadro 6. Fases do ciclo cultural do arroz observadas nas datas de amostragem de terra e água, no solo A e B  | 24 |
| Quadro 7. Características físicas e químicas do solo A, localizado no Paul de Magos   | 27 |
| Quadro 8. Características físicas e químicas do solo B, localizado no Paul de Magos   | 27 |
| Quadro 9. Características mineralógicas dos solos A e B   | 28 |
| Quadro 10. Caracterização das águas de rega utilizadas nas duas parcelas (A e B)  | 29 |
| Quadro 11. Dinâmica do $N_{\text{inorgânico}}$ nos solos A e B, ao longo do ciclo cultural do arroz (2010)  | 35 |
| Quadro 12. Resultados médios (desvio-padrão) obtidos nas incubações aeróbias dos solos A e B  | 41 |
| Quadro 13. Resultados médios (desvios-padrão) obtidos nas incubações anaeróbias dos solos A e B   | 42 |
| Quadro 14. Resultado da aplicação do algoritmo de Levenberg-Marquardt para a incubação aeróbia, anaeróbia e ambas, na profundidade 0-15 cm  | 44 |
| Quadro 15. Algumas características físico-químicas medidas nas lâminas de água, à superfície dos dois solos testados (2010)   | 44 |
| Quadro 16. Resultados da ANOVA ("Main-effects") e separação das médias dos teores de $N\text{-NH}_4^+$ e $N\text{-NO}_3^-$ nas lâminas de água à superfície dos solos A e B, durante o ciclo cultural do arroz (2010)   | 45 |
| Quadro 17. Resultado da ANOVA (MLG) e separação de médias (desvios-padrão) da matéria seca ( $\text{kg MS ha}^{-1}$ ) produzida nos diferentes órgãos da planta de arroz, nos solos A e B   | 47 |
| Quadro 18. Resultados da ANOVA (MLG) e separação de médias dos valores SPAD determinados na folha "Y" das plantas de arroz, em ambos os solos A e B   | 48 |
| Quadro 19. Resultado da ANOVA (MLG) e separação de médias do $N_{\text{total}}$ ( $\text{g N kg}^{-1}$ ) e $N_{\text{exportado}}$ ( $\text{kg N ha}^{-1}$ ) pelos diferentes órgãos da planta de arroz produzida nos dois solos A e B, e resultado de "One-way ANOVA" para o N total exportado ( $\text{kg N ha}^{-1}$ ) pela planta completa | 50 |
| Quadro 20. Valores da interação do teor de $N_{\text{total}}$ ( $\text{g N kg}^{-1}$ ) nos vários órgãos da planta de arroz cultivada e os solos (A e B)  | 51 |

## Lista de Figuras

|  |    |
|--|----|
| Fig. 1. Vistas parciais de campos de arroz cultivado (a) e após colheita (b), com presença de cegonha-branca ( <i>Ciconia ciconia</i> L.).   | 6  |
| Fig. 2. Evolução da área e produtividade de arroz em Portugal, nos últimos 50 anos.  | 7  |
| Fig. 3. Ciclo vegetativo da planta do arroz.   | 11 |
| Fig. 4. Dinâmica do N, em solos alagados de produção de arroz.   | 15 |
| Fig. 5. Relação entre a curva de crescimento e a curva de absorção de N.   | 18 |
| Fig. 6. Localização das parcelas e locais de ensaios, solos A e B.   | 20 |
| Fig. 7. Normais climatológicas (temperatura e precipitação) no período de 1971 - 2000 na estação meteorológica de Santarém (IM, 2011).   | 21 |
| Fig. 8. Distribuição da temperatura média mensal (T <sub>méd</sub> ), máxima mensal (T <sub>máx</sub> ) e mínima mensal (T <sub>mín</sub> ) e da precipitação acumulada mensal (P) e evapotranspiração mensal (ET <sub>0</sub> ), em Salvaterra de Magos (2010). | 21 |
| Fig. 9. Operações culturais efetuadas nos solos A e B, e identificação das datas de amostragem de terra e água (2010).   | 23 |
| Fig. 10. Sementeira por via aérea da cultura de arroz, em Salvaterra de Magos (2010).  | 25 |
| Fig. 11. Efeito da interação solo x data de amostragem sobre o teor de N <sub>inorgânico</sub> , ao longo do ciclo cultural do arroz (2010).   | 36 |
| Fig. 13. Efeito da interação solo x data de amostragem sobre o teor do N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , nos dois solos (A e B) de Salvaterra de Magos.   | 39 |
| Fig. 14. Efeito da interação profundidade x data de amostragem nos teores de N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> em ambos os solos (A e B) (2010).  | 39 |
| Fig. 15. Mineralização potencial do N, aplicação do algoritmo de Levenberg-Marquardt.  | 43 |
| Fig. 16. Interação solo x data sobre os teores de N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> nas lâminas de água à superfície dos solos A e B (2010).  | 46 |
| Fig. 17. Valores SPAD determinados nas folhas "Y" da planta de arroz, nos dois solos e curva de regressão ajustada.  | 49 |

## Lista de Abreviaturas

|                  |   |   |
|------------------|---|---|
| AAVM             | – | “Associação de Agricultores do Vale do Mondego”             |
| C                | – | carbono   |
| C/N              | – | razão carbono/azoto   |
| Ca <sup>2+</sup> | – | ião cálcio  |
| CE               | – | condutividade elétrica                                      |
| CH <sub>4</sub>  | – | metano  |
| Cl <sup>-</sup>  | – | ião cloreto   |
| CO <sub>2</sub>  | – | dióxido de carbono  |
| COTArroz         | – | “Centro Operativo e Tecnológico do Arroz”                   |
| CTC              | – | capacidade de troca catiónica                               |
| Cu               | – | cobre   |
| cv.              | – | cultivar  |
| EA               | – | Eficiência de Agronómica                                    |
| ER               | – | Eficiência de Recuperação                                   |
| <i>et al.</i>    | – | e outros  |
| ET0              | – | evapotranspiração mensal                                    |
| EUA              | – | Estados Unidos da América                                   |
| EUN              | – | Eficiência de utilização do azoto                           |
| EUROSTAT         | – | “The Statistical Office of the European Union”              |
| FAO              | – | “Food and Agriculture e Organization of the United Nations” |
| FAOSTAT          | – | “FAO Statistical Database”                                  |
| Fe               | – | ferro   |
| g                | – | grama   |
| GEEs             | – | gases com efeito de estufa                                  |
| GPP              | – | “Gabinete de Planeamento e Políticas”                       |
| ha               | – | hectare   |
| IC               | – | Índice à Colheita   |
| INE              | – | “Instituto Nacional de Estatística”                         |
| INSA             | – | “Instituto Nacional de Saúde Dr. Ricardo Jorge”             |
| IRGSP            | – | “International Rice Genome Sequencing Project”              |
| ISO              | – | “International Organization for Standardization”            |
| ISRIC            | – | “International Soil Reference and Information Center”       |
| IUSS             | – | “International Union of Soil Sciences”                      |
| K                | – | potássio  |
| K <sup>+</sup>   | – | ião potássio  |
| L-INIA           | – | “Instituto Nacional de Investigação Agrária”                |
| Mg <sup>2+</sup> | – | ião magnésio  |

|                                |   |   |
|--------------------------------|---|---|
| MO                             | – | matéria orgânica  |
| MS                             | – | matéria seca  |
| N                              | – | azoto   |
| N <sub>2</sub>                 | – | azoto molecular   |
| N <sub>2</sub> O               | – | óxido de azoto  |
| Na <sup>2+</sup>               | – | ião sódio   |
| NH <sub>3</sub>                | – | amoníaco  |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>   | – | ião amónio  |
| N <sub>inorgânico</sub>        | – | azoto inorgânico (amoniacal + nítrico)                  |
| N-NH <sub>3</sub>              | – | azoto na forma de amoníaco                              |
| N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | – | azoto amoniacal   |
| N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | – | azoto nítrico   |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>   | – | ião nitrato   |
| N <sub>orgânico</sub>          | – | azoto orgânico  |
| NO <sub>x</sub>                | – | óxidos de azoto   |
| O <sub>2</sub>                 | – | oxigénio  |
| °C                             | – | Graus Celsius   |
| ORIVÁRZEA                      | – | “Orizicultores da Várzea de Samora e Benavente”         |
| P                              | – | fósforo   |
| pH <sub>(H2O)</sub>            | – | reação do solo, medido em água                          |
| RE                             | – | eficiência de recuperação                               |
| s.a.                           | – | substância ativa  |
| SPAD                           | – | “Soil Plant Analysis Development”                       |
| t                              | – | tonelada  |
| Tg                             | – | Teragrama (10 <sup>12</sup> g)                          |
| Tmáx                           | – | temperatura máxima mensal                               |
| Tméd                           | – | temperatura média mensal                                |
| Tmín                           | – | Temperatura mínima mensal                               |
| UE                             | – | União Europeia  |
| UIARN                          | – | “Unidade de Investigação, Ambiente e Recursos Naturais” |
| UNICEF                         | – | “United Nations Children’s Fund”                        |
| VMR                            | – | Valor Máximo Recomendado                                |
| Zn                             | – | zinco   |

## 1. Introdução

A obtenção de nutrientes, pelo Homem, de modo a assegurar a sua vitalidade, permitindo ter um bom estado de saúde, quer físico ou psicológico, é uma necessidade. Para tal, recorre à alimentação ingerindo uma grande diversidade de alimentos, que variam muito a nível geográfico, económico e cultural. O arroz é uma importante fonte alimentar à escala global, abrangendo cerca de metade da população mundial e desempenhando um papel fundamental na segurança alimentar (Pandey *et al.*, 2010; Krishnan *et al.*, 2011).

Ao longo da História, e com o aumento populacional, o Homem procurou, e continua a aperfeiçoar, as práticas agrícolas que melhor permitem o cultivo das plantas. Algumas dessas práticas incluem a fertilização das culturas, que obteve um enorme progresso no passado século, com a síntese dos fertilizantes, em especial, os azotados, que permitiram o aumento da produtividade. Contudo, a inadequada utilização desses fertilizantes, em especial o azoto (N) conduziram, muitas vezes, à eutrofização de águas superficiais, à contaminação das águas subterrâneas com excessos de nutrientes lixiviados das camadas superficiais, e a perdas gasosas por volatilização, desnitrificação ou nitrificação incompleta, poluindo a atmosfera.

Os fertilizantes minerais são, ainda, um dos *inputs* mais dispendiosos e se usados imprópriamente, para além de poluírem o ambiente, podem também diminuir a eficiência da sua utilização pelas culturas, com os consequentes aumentos dos custos unitários de produção. De acordo com Cassman *et al.* (1993), Ladha *et al.* (2005) e Carranca (2010), a eficiência de utilização do N (EUN) é normalmente baixa (20 - 60%), devido às diversas perdas a que o nutriente está sujeito, quer por volatilização, desnitrificação, lixiviação, escorrimento superficial, erosão ou “fixação” do ião amónio nos minerais argilosos (Carranca, 1986, 1996, 2000; De Varennes, 2003; Choudhury & Kennedy, 2005; Figueiredo *et al.*, 2011).

As práticas agrícolas que visam melhorar a eficiência de utilização dos nutrientes incluem uma adequada preparação do solo, a correção do pH do solo, o uso adequado de fontes de nutrientes orgânicos ou minerais, nas quantidades, métodos de aplicação e datas de aplicação adequadas, uma gestão adequada da água, o controlo de pragas e doenças, bem como o uso de cultivares altamente produtivas e bem adaptadas às condições ambientais (Fageria *et al.*, 2003).

Os nutrientes são elementos necessários para a planta completar o seu ciclo de vida, desempenhando funções na planta e estando envolvidos no seu metabolismo (Taiz & Zeiger, 2002; De Varennes, 2003).

As necessidades nutritivas das culturas dependem do nível de produção pretendido, da espécie cultivada, cultivar ou genótipo, tipo e qualidade do solo e das condições climáticas. Por isso, o solo, a planta e os fatores climáticos e as suas interações estão envolvidos na determinação das necessidades nutricionais das plantas. Além destes fatores, o valor económico da cultura e as condições socioeconómicas do produtor também são importantes. A produção e produtividade agrícola estão diretamente ligadas com a disponibilidade e absorção dos nutrientes (Fageria, 2009).

No sentido de otimizar a utilização dos fertilizantes pela cultura do arroz, um conhecimento da dinâmica dos nutrientes no solo, principalmente o N, é fundamental. Nesse sentido, este trabalho pretende avaliar a dinâmica do N nos solos e na lâmina de água à superfície dos mesmos, analisar a mineralização/imobilização, nitrificação potencial do N nos solos melhorados com o resíduo da cultura anterior, em condições aeróbias e anaeróbias, e determinar a resposta do arroz (produtividade, exportação de N, medições SPAD) às práticas culturais (incorporação de resíduos no solo, alagamento/drenagem do solo, fertilização) em duas parcelas diferentes.

## 2. Revisão bibliográfica

### 2.1. Importância da cultura do arroz

O cultivo de arroz, *Oryza sativa* L., terá começado a ser praticado à 7000 – 6600 anos, no vale do rio Yangtze, na China (Vaughan *et al.*, 2008; Fuller *et al.*, 2009), sendo posteriormente difundido pelo Mundo. A introdução da cultura na Europa terá ocorrido na Grécia, no século IV a.C., aquando da expedição de Alexandre, o Grande, à Índia, crescendo a sua distribuição, gradualmente, no sul da Europa e para o norte de África. Na época dos Descobrimentos, os portugueses introduziram o seu cultivo na Guiné-Bissau e Brasil, e os espanhóis, na América Central (Kush, 1997; Maclean *et al.* 2002). Uma diferente espécie de arroz, *Oryza glaberrima* Steud, terá tido origem na parte ocidental de África, no delta do rio Níger (Sweeney & McCouch, 2007). O arroz de origem asiática, *O. sativa* L., passou a ser amplamente cultivado pelo mundo, enquanto o arroz de origem africana, *O. glaberrima* Steud, manteve uma localização circunscrita à parte ocidental de África (Kush, 1997; Londo *et al.*, 2006; Sweeney & McCouch, 2007).

A principal espécie cultivada de arroz, o *O. sativa* L., divide-se em duas subespécies: *indica* e *japonica*, de acordo com as características morfológicas e a distribuição geográfica. O cultivo do arroz *japonica* está associado às zonas de clima temperado, enquanto o *indica* está mais difundido nas zonas tropicais e subtropicais (Mae, 1997; Londo *et al.*, 2006; Negrão *et al.*, 2008). A subespécie *indica* é a mais cultivada, representando cerca de 80% da produção mundial de arroz (Leung & An, 2004). Com base nas características morfológicas e fisiológicas, a subespécie *japonica* contempla as cultivares temperadas (*japonica*) e tropicais (*javanica* ou *tropical japonica*). A cultivar *japonica* (temperada) é predominantemente cultivada no nordeste da Ásia, Europa, Estados Unidos da América (EUA) e Austrália, enquanto que a cultivar *tropical japonica* ou *javanica* é comum no sudeste Asiático, no sul da China, na América Latina e em África (Glaszmann, 1987).

#### 2.1.1. No mundo

O arroz, o trigo (*Triticum* spp.) e o milho (*Zea mays* L.) são as três principais culturas alimentares no mundo. Juntos fornecem cerca de 50% do total de calorias consumidas pelo Homem. O arroz fornece à dieta mundial 20% de energia, enquanto o trigo fornece 19% e o milho apenas 5% (FAO, 2004a). Assumindo grande impacto na segurança alimentar, as Nações Unidas designaram o ano 2004 como o ano internacional do arroz.

A maior produção de arroz, superior a 90%, encontra-se associada ao continente asiático, estando a China e a Índia no topo dos países produtores. Para além do continente asiático, os EUA, o Brasil e no continente africano, em especial o Egito, são os principais países produtores de arroz. O Egito é o país onde a produtividade do arroz é maior (10,0 t ha<sup>-1</sup>), seguido dos EUA (7,9 t ha<sup>-1</sup>) e os países da Oceania (8 t ha<sup>-1</sup>). A China e o Japão são os países da Ásia com melhor produtividade, superior a 6,5 t ha<sup>-1</sup> (Quadro 1). No Bangladesh e Vietname, verifica-se que a área de terra arável é inferior à área de produção de arroz, devido ao facto da instalação da cultura na mesma área, mais que uma vez no ano, prática usual em muitas zonas da Ásia.

Quadro 1. Principais países produtores de arroz, áreas de produção e produtividade (2009)

| Continente/País | Produção<br>(10 <sup>6</sup> t) | Área<br>(10 <sup>6</sup> ha) | Terra arável<br>(10 <sup>6</sup> ha) | % Mundial |       | Produtividade<br>(t ha <sup>-1</sup> ) |
|-----------------|---------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|-----------|-------|--|
|                 |                                 |                              |                                      | Produção  | Área  |  |
| África          | 24,4                            | 10,0                         | 222,80                               | 3,6       | 6,2   | 2,44                                   |
| América         | 38,2                            | 7,3                          | 365,43                               | 5,6       | 4,5   | 5,25                                   |
| Ásia            | 611,7                           | 143,4                        | 470,28                               | 90,1      | 88,8  | 4,36                                   |
| Europa          | 4,1                             | 0,7                          | 276,99                               | 0,6       | 0,4   | 6,14                                   |
| Oceânia         | 0,3                             | 0,0                          | 45,02                                | 0,0       | 0,0   | 8,03                                   |
| China           | 197,3                           | 29,9                         | 108,6                                | 29,1      | 18,5  | 6,59                                   |
| Índia           | 131,3                           | 44,1                         | 158,1                                | 19,3      | 27,3  | 2,98                                   |
| Indonésia       | 64,4                            | 12,9                         | 22,0                                 | 9,5       | 8,0   | 5,00                                   |
| Bangladesh      | 45,1                            | 11,5                         | 7,9                                  | 6,6       | 7,1   | 3,92                                   |
| Vietname        | 38,9                            | 7,4                          | 6,3                                  | 5,7       | 4,6   | 5,23                                   |
| Tailândia       | 31,5                            | 11,0                         | 15,2                                 | 4,6       | 6,8   | 2,87                                   |
| Filipinas       | 16,3                            | 4,5                          | 5,3                                  | 2,4       | 2,8   | 3,59                                   |
| Brasil          | 12,6                            | 2,9                          | 61,0                                 | 1,9       | 1,8   | 4,37                                   |
| Japão           | 10,6                            | 1,6                          | 4,3                                  | 1,6       | 1,0   | 6,52                                   |
| Paquistão       | 10,3                            | 2,9                          | 20,3                                 | 1,5       | 1,8   | 3,58                                   |
| EUA             | 10,0                            | 1,3                          | 170,5                                | 1,5       | 0,8   | 7,94                                   |
| Cambodja        | 7,6                             | 2,7                          | 3,9                                  | 1,1       | 1,7   | 2,84                                   |
| Egito           | 7,5                             | 0,8                          | 2,8                                  | 1,1       | 0,5   | 10,00                                  |
| Nepal           | 4,5                             | 1,6                          | 2,4                                  | 0,7       | 1,0   | 2,91                                   |
| Sri Lanka       | 3,7                             | 1,0                          | 1,3                                  | 0,5       | 0,6   | 3,80                                   |
| Mundo           | 678,7                           | 161,4                        | 1380,5                               | 100,0     | 100,0 | 4,20                                   |

(Fonte: FAOSTAT, 2010).

No que respeita ao consumo, a maioria do arroz é consumida no país de produção, apresentando pouca importância no comércio internacional (Conklin & Stilwell, 2007), onde apenas uma pequena proporção da produção entra em transação (5 - 7%), comparativamente ao trigo (20%) e ao milho (13%) (Mohanty, 2010). Deste modo, o mercado internacional de arroz encontra-se mais suscetível à volatilidade dos preços (Childs & Baldwin, 2010).

Segundo os dados das Nações Unidas, o consumo mundial de arroz *per capita* aumentou 40% no final do século passado, sendo mais elevado na Ásia, com um consumo médio *per capita* próximo dos 80 kg ano<sup>-1</sup>. Na América do sul e África, o consumo *per capita* varia entre os 20 e 30 kg ano<sup>-1</sup>. Na Europa e América do norte, o consumo médio é inferior a 10 kg ano<sup>-1</sup> (FAOSTAT, 2010).

O arroz é consumido, principalmente, na forma de grão, ao contrário de outros cereais, que são consumidos após transformação. Dentre os cereais, o arroz é o que apresenta maiores teores de glúcidos (Graham, 2004), mas menor percentagem de proteína, lípidos e fibra. No entanto, a proteína do arroz é a mais nobre entre os cereais. Embora quantitativamente pequena, apresenta a melhor composição de aminoácidos para o metabolismo humano (entre os cereais). Quando metabolizado, gera menos resíduos azotados favorecendo a função renal. O processo físico de branqueamento que inclui o descasque (eliminação das glumélulas), a eliminação das cutículas do pericarpo e polimento a que o arroz está, normalmente, sujeito provoca uma redução no teor de sais minerais, vitaminas e

fibra (Conklin & Stilwell, 2007). O arroz também não contém vitamina A e D, contendo principalmente as vitaminas do complexo B e  $\alpha$ -tocoferol (vitamina E) (Quadro 2).

Quadro 2. Características químicas do arroz cru por 100 g de matéria seca

| Característica                    | Arroz integral | Arroz branqueado |
|-----------------------------------|----------------|------------------|
| Água (g)                          | 12,2           | 13,9             |
| Proteína (g)                      | 8,6            | 6,7              |
| Lípidos (g)                       | 2,5            | 0,4              |
| Glúcidos (g)                      | 71,6           | 78,1             |
| Fibra (g)                         | 3,8            | 2,1              |
| Sódio (mg)                        | 3,0            | 6,0              |
| Potássio (mg)                     | 248            | 94               |
| Cálcio (mg)                       | 9,0            | 13               |
| Fósforo (mg)                      | 267            | 87               |
| Magnésio (mg)                     | 109            | 32               |
| Vitamina A ( $\mu$ g)             | 0              | 0                |
| Vitamina D ( $\mu$ g)             | 0              | 0                |
| $\alpha$ -tocoferol (vit. E) (mg) | 0,10           | 0,70             |
| Tiamina (vit. B1) (mg)            | 0,40           | 0,06             |
| Riboflavina (vit. B2) (mg)        | 0,10           | 0,03             |
| Niacina (vit. B3) (mg)            | 4,1            | 2,0              |
| Vitamina B6 (mg)                  | 0,60           | 0,29             |
| Folatos ( $\mu$ g)                | 55             | 19               |

Arroz integral=arroz não descascado; Arroz branqueado=arroz que sofreu o processo de branqueamento. (Fonte: INSA, 2010).

Dadas as suas características, existem problemas associados a uma deficiente nutrição quando a dieta assenta, fundamentalmente, no arroz (Graham, 2004). É o caso da cegueira provocada pela deficiência de vitamina A, a xeroftalmia. Esta deficiência compromete também o sistema imunitário de cerca de 40% das crianças com menos de cinco anos nos países em desenvolvimento, causando a morte de um milhão de crianças por ano (UNICEF, 2004; Barry, 2005). De modo a combater esta hipovitaminose foi criado um arroz geneticamente modificado, denominado, “*Golden Rice*”, capaz de produzir  $\beta$ -caroteno (provitamina A), que o corpo humano depois converterá em vitamina A (Barry, 2005; Paine *et al.*, 2005).

A deficiência de ferro (Fe) é também um problema generalizado, principalmente, nos países em desenvolvimento, sobretudo nas crianças. Em face disto, e uma vez que as variedades de arroz também possuem baixos teores de Fe, as abordagens biotecnológicas para manipular a ferritina na semente de arroz poderão vir a resolver esta deficiência (Vasconcelos *et al.*, 2003; Datta *et al.*, 2007).

Para estes avanços na manipulação nutricional do arroz contribuiu o facto de o arroz ter sido uma das primeiras plantas a ter o seu genoma sequenciado para as duas subespécies, *indica* e *japonica* (Goff *et al.*, 2002; Yu *et al.*, 2002), tendo sido concluída a sequenciação completa em 2005, ficando esta a ser a primeira cultura com o código genético caracterizado (IRGSP, 2005), simplificando a sua manipulação genética.

Os campos de arroz por alagamento são *habitat* de várias espécies de fauna e flora, contribuindo para a biodiversidade (Fig. 1), muito em particular, em Portugal. Nalguns casos, estas

espécies são fonte de rendimento e alimento para a população, sendo esta a principal origem de proteína animal e ácidos gordos essenciais, principalmente na Ásia (FAO, 2004b; Halwart, 2006). Muitos dos organismos aquáticos encontrados nos ecossistemas de arroz desempenham um papel importante no controlo biológico de doenças e pragas, desempenhando um papel significativo de saúde pública e agrícola (Halwart, 2006). Os arrozais alagados, além de oferecerem abrigo e alimentação, são locais de reprodução e nidificação de muitas espécies animais, oferecendo também refúgio a animais que, não sendo habitantes permanentes, visitam o ecossistema por diversos motivos (Edirisinghe & Bambaradeniya, 2006).

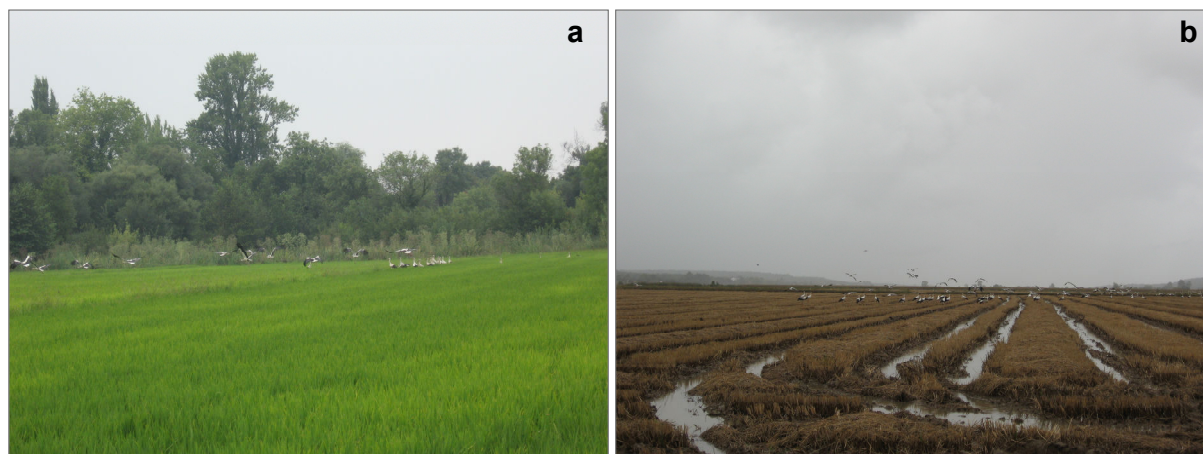


Fig. 1. Vistas parciais de campos de arroz cultivado (a) e após colheita (b), com presença de cegonha-branca (*Ciconia ciconia* L.).

### 2.1.2. Em Portugal

No conjunto dos vinte e sete países da União Europeia (UE), Portugal é o quarto maior produtor de arroz, com 156 952 t (Quadro 3). A produção é liderada pela Itália, com 1 493 000 t, seguida da Espanha, com uma produção de 899 000 t, representando cerca de 80% do total da produção da UE. O terceiro maior produtor é a Grécia, com uma produção de 205 000 t (EUROSTAT, 2010).

Quadro 3. Área, produtividade e produção de arroz em Portugal (2009)

| Região Agrária   | Área de cultivo (ha) | Produtividade (kg ha <sup>-1</sup> ) | Produção (t) | Área de cultivo (%) | Produção (%) |
|------------------|----------------------|--------------------------------------|--------------|---------------------|--------------|
| Beira Litoral    | 6 347                | 4 757                                | 30 195       | 23                  | 19           |
| Ribatejo e Oeste | 11 862               | 5 832                                | 69 179       | 42                  | 44           |
| Alentejo         | 9 493                | 5 948                                | 56 461       | 34                  | 36           |
| Algarve          | 228                  | 4 900                                | 1 117        | 1                   | 1            |
| Portugal         | 27 930               | 5 619                                | 156 952      | 100                 | 100          |

(Fonte: INE, 2010).

Cerca de 60% do arroz produzido na UE é do tipo *japonica*, sendo o arroz tipo *indica* produzido, principalmente, em Espanha e, em menor escala, na Grécia (GPP, 2007). Em Portugal, a

produção de arroz é predominantemente do tipo *japonica* (70%) e o restante do tipo *indica* (Monteiro, 2011).

Ao longo dos últimos 50 anos, a área de produção de arroz em Portugal sofreu um decréscimo, estabilizando a partir de 1996 para valores a rondar os 28 000 ha. A produtividade, por outro lado, registou um aumento neste período, com um valor médio de 5 829 kg ha<sup>-1</sup> (Fig. 2) (FAOSTAT, 2010), atingindo no ano de 2010, o valor de 5 619 kg ha<sup>-1</sup> (INE, 2010). Este aumento da produtividade resultou de um maior recurso a fatores de produção e tecnologia (GPP, 2007).

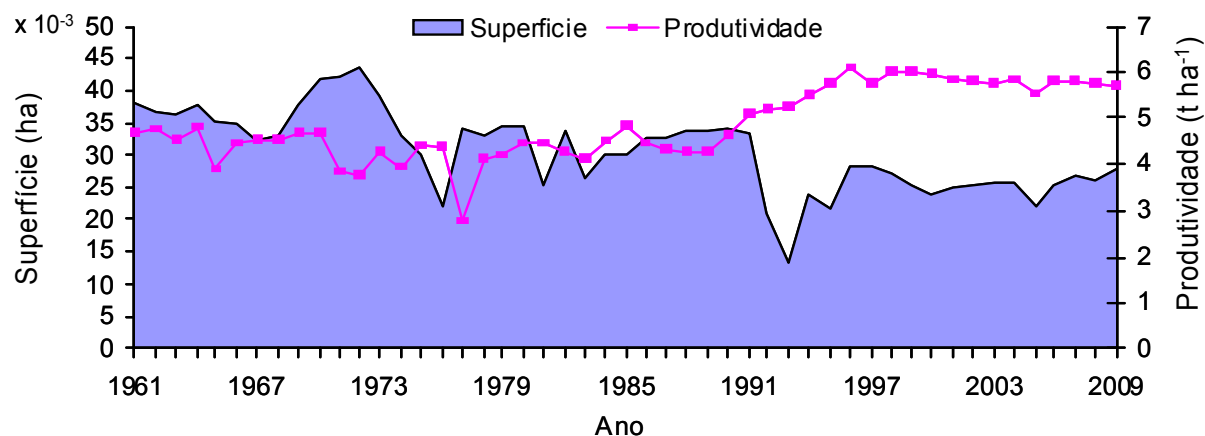


Fig. 2. Evolução da área e produtividade de arroz em Portugal, nos últimos 50 anos (FAOSTAT, 2010).

Com um consumo de arroz branqueado, *per capita*, da ordem dos 18 kg ano<sup>-1</sup> (Monteiro, 2011), Portugal lidera o consumo deste cereal na Europa. No entanto, os hábitos alimentares dos portugueses têm vindo a alterar-se ao longo dos últimos anos, verificando-se a opção pelo consumo de arroz de grão longo, em detrimento do arroz de grão médio ou curto, os mais consumidos até 1987. Desde a campanha de 2004/2005, o consumo de arroz de grão médio ou curto passou de 0,7 para 0,2 kg habitante<sup>-1</sup> (INE, 2010).

Em Portugal, o grão de arroz é classificado, comercialmente, de acordo com a sua dimensão. De acordo com a legislação portuguesa (Dec. Lei n.º 62/2000) distinguem-se três tipos comerciais de arroz (Quadro 4).

Quadro 4. Características para classificação comercial do arroz em Portugal

| Classificação Comercial | Comprimento (mm) | Comprimento/largura | Tipo comercial |
|-------------------------|------------------|---------------------|----------------|
| Arroz de grãos redondos | ≤5,2             | <2                  |                |
| Arroz de grãos médios   | >5,2 - 6         | <3                  |                |
| Arroz de grãos longos   | >6               | >2 - <3             | Carolino       |
|                         | >6               | ≥3                  | Agulha         |

(Fonte: Dec. Lei n.º 62/2000).

Os principais locais de cultivo de arroz em Portugal situam-se em quatro regiões agrárias, abrangendo as zonas de aluvião junto aos rios Mondego, Tejo e Sado, designadamente as regiões do Ribatejo e Oeste e do Alentejo, responsáveis por 80% da produção nacional (Quadro 3). As

condições naturais destes locais de cultivo caracterizam-se pela disponibilidade hídrica e a influência marítima, com ausência de alternativas culturais (GPP, 2007).

A sementeira do arroz, no País, efetua-se, normalmente, em meados de abril/maio, sendo a colheita em setembro/outubro. O sistema de cultivo assenta, fundamentalmente, nos canteiros alagados (Maclean *et al.*, 2002; Ferrero, 2007). Este sistema é responsável por 75% da produção mundial de arroz, o único cereal a suportar as condições de alagamento (Bouman *et al.*, 2007).

### **2.1.3. Sistemas de cultivo do arroz**

O cultivo de arroz depende do regime hídrico dominante, distribuindo-se por quatro principais classificações: arroz de regadio (alagamento, aspersão), arroz de sequeiro nas terras altas (China); arroz de sequeiro de terras baixas (China) e arroz de águas profundas (Bouman *et al.*, 2007).

O arroz de regadio por alagamento é o sistema de cultivo predominante no mundo, ocupando metade da área de produção, sendo responsável por três quartos da produção mundial. Este sistema é caracterizado pelo recurso ao alagamento dos canteiros, de forma controlada e durante pelo menos 80% do ciclo vegetativo da cultura (Kush, 1997; Bouman *et al.*, 2007; Hijmans, 2007).

As terras baixas de sequeiro também poderão ser alagadas durante alguma fase do ciclo cultural (Hijmans, 2007). No entanto, o fornecimento de água é exclusivamente resultante da precipitação. É o segundo sistema mais utilizado, ocupando 34% da área de produção deste cereal (Bouman *et al.*, 2007).

No sistema de produção de arroz de sequeiro nas terras altas não ocorre qualquer tipo de alagamento ou outro tipo de rega (Hijmans, 2007). Os solos são bem arejados e o sistema representa 9% da área mundial de produção de arroz (Bouman *et al.*, 2007).

No cultivo em águas profundas, a cultura sofre, periodicamente, sem qualquer tipo de controlo, inundações, cuja altura poderá ser superior a 3 m (Kush, 1997). Este sistema representa 7% da produção mundial de arroz (Bouman *et al.*, 2007).

## **2.2. Principais fatores edafo-climáticos que afetam a cultura do arroz**

As condições de cultivo do arroz variam com a disponibilidade de água, a altitude e o tipo de solo. O arroz é produzido numa grande variedade de climas, desde as zonas mais chuvosas do Mundo, com precipitação superior a 5 100 mm, a zonas com registo de precipitação anual inferior a 100 mm (Maclean *et al.*, 2002).

É possível encontrar arroz cultivado a três metros abaixo do nível do mar até elevações superiores a 3 000 m (Krishnan *et al.*, 2011).

Para um ótimo crescimento e produção, o arroz necessita de água distribuída uniformemente durante o ciclo cultural. Contudo, na fase de enchimento do grão requer um período seco (Krishnan *et al.*, 2011).

Na fase de crescimento, a cultura de arroz necessita de temperaturas relativamente elevadas (cerca de 21 °C). Durante o enchimento do grão, as temperaturas noturnas elevadas são prejudiciais (Krishnan *et al.*, 2011).

### **2.2.1. Solo**

A planta de arroz encontra-se bem adaptada a uma grande diversidade de solos. Para uma ótima produtividade do arroz, são características fundamentais, uma boa profundidade do solo e a presença de um horizonte impermeável que permita uma boa retenção da água no solo. Os solos de textura argilosa a argilo-limosa são os mais adequados para a produção de arroz por alagamento. Os solos de textura mais grosseira são menos apropriados para este tipo de produção em alagamento, devido a uma menor capacidade de retenção de água e nutrientes (Fageria *et al.*, 2003).

O alagamento origina alterações físicas, químicas e biológicas no solo, com benefício para o desenvolvimento do arroz. Entre as vantagens encontra-se o aumento da disponibilidade de fósforo (P) e o pH do solo que tende para a neutralidade, independentemente da reação do solo ser ácida ou alcalina (Ponnamperuma, 1972; Keeney & Sahrawat, 1986; Portero, 2001), bem como um melhor controlo das infestantes.

Como desvantagens, encontram-se, a emissão de gases com efeito de estufa (GEEs) [metano (CH<sub>4</sub>) e óxidos de azoto (NO<sub>x</sub>)], a volatilização do amoníaco (NH<sub>3</sub>) e também a diminuição da solubilidade do zinco (Zn) e do cobre (Cu), que pode causar deficiências nas plantas (Reddy & Patrick, 1986; Portero, 2001). Os campos de arroz são responsáveis pela emissão de 25 a 50 Tg ano<sup>-1</sup> de CH<sub>4</sub> (Cole *et al.*, 1996; Conen *et al.*, 2010), o que corresponde a aproximadamente 10% da emissão total deste GEE (Læg Reid *et al.*, 1999; Dobermann & Fairhurst, 2000). Ao considerar uma emissão anual de 50 Tg de CH<sub>4</sub> pelos arrozais, a produção de 1 kg de arroz corresponde à emissão de 100 g de CH<sub>4</sub> (Le Mer & Roger, 2001). O metano produzido nos campos de arroz é o produto final da decomposição anaeróbia de compostos orgânicos no solo (Conen *et al.*, 2010). A decomposição é realizada por bactérias metanogénicas anaeróbias obrigatórias que pertencem aos géneros *Methanobacterium*, *Methanococcus*, *Methanosarcina* e *Methanospirillum* (De Varennes, 2003), mas a produção de CH<sub>4</sub> tem início com os organismos metanotróficos (*Archaea*), que são também anaeróbios facultativos, utilizando a luz para obtenção de energia. A incorporação de resíduos no solo (ex. palha da cultura anterior), próximo do alagamento produz três ou quatro vezes mais CH<sub>4</sub> comparado com os resíduos incorporados a 30 ou mais dias antes do alagamento dos canteiros (Yan *et al.*, 2005).

Em relação às emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), outro GEE, o tema é controverso. Chen *et al.* (2001) referem que o cultivo continuado de arroz tem tendência de aumentar as emissões deste gás. Por outro lado, alguns autores referem que os campos de arroz atuam como um sumidouro líquido das emissões de CO<sub>2</sub> (Saito *et al.*, 2005).

As alterações verificadas no solo devem-se a processos de oxidação-redução desencadeados no solo (De Datta, 1981; Portero, 2001). Após poucas horas de inundação, os microrganismos consomem o oxigénio (O<sub>2</sub>) que se encontrava disponível no solo. Depois deste desaparecimento, os níveis de CO<sub>2</sub> aumentam, devido à respiração microbiana. Também, devido à atividade anaeróbia podem aumentar os níveis de CH<sub>4</sub> (Yoshida, 1981; Neue, 1993; Watanabe *et al.*, 1993). Contudo, existe uma fina camada superficial do solo que contém O<sub>2</sub> (camada aeróbia). Encontra-se em contacto com a lâmina de água, cuja espessura varia com o ciclo cultural (Ponnamperuma, 1972; Reddy *et al.*, 1980; Neue, 1993).

Os processos de redução que ocorrem nos solos alagados provocam aumentos de pH nos solos ácidos e diminuição nos solos alcalinos, para próximo da neutralidade, logo após os primeiros 2 – 3 dias de alagamento. O aumento está relacionado com a redução dos óxidos de Fe(III) a Fe(II) e Mn(IV) a Mn(II); a diminuição do pH deve-se à formação de CO<sub>2</sub> pela decomposição da matéria orgânica (MO) (Ponnamperuma, 1972). Fatores como o pH inicial do solo, a quantidade de MO, a textura do solo, o teor de Fe e/ou Mn presente no solo determinam o tipo de variação do pH após o alagamento (Fageria *et al.*, 2003).

As alterações físicas do solo provocadas pelo cultivo do arroz por alagamento, incluem a alteração da estrutura do solo, criando uma camada compacta, geralmente, entre os 15 e 25 cm de profundidade (Cass *et al.*, 1994). Esta condição é desejada para evitar as perdas de água por percolação diminuindo a porosidade do solo e conseqüentemente a drenagem (Prihar *et al.*, 1985; Bahmaniar, 2008). O alagamento diminui os poros superiores a 30 µm, aumentando os poros inferiores a 0,6 µm (Sharma & De Datta, 1985).

A alteração da estrutura dos solos alagados do arroz, torna-os muitas vezes, impróprios para outras culturas. A rotação cultural diminui este efeito adverso, mas em Portugal, tradicionalmente, não se realiza.

## **2.2.2. Clima**

Os fatores climáticos que mais influenciam a produção de arroz são: a temperatura, a radiação solar e a precipitação (Yoshida, 1981; Pereira, 1989; Mikkelsen *et al.*, 1995).

As maiores produtividades de arroz são obtidas em condições temperadas (Mikkelsen *et al.*, 1995). Nestas regiões, o cultivo do arroz inicia-se com temperaturas entre 13 °C e 20 °C, na primavera, e a colheita antes das temperaturas baixarem para 13 °C, no outono (Yoshida, 1981).

### **2.2.2.1. Temperatura**

O arroz *japonica* germina melhor a temperaturas mais baixas, por comparação com o *indica*. Dum modo geral, a cultura do arroz é afetada negativamente pelas baixas temperaturas das regiões temperadas (Krishnan *et al.*, 2011).

As exigências em temperatura são diferentes ao longo do ciclo cultural do arroz (Yoshida, 1981; Pereira, 1989; Portero, 2001; Krishnan *et al.*, 2011). A temperatura crítica, isto é, a temperatura abaixo ou acima da qual se dá a redução da intensidade dos processos biológicos, como a respiração, fotossíntese, absorção radicular e translocação das substâncias orgânicas para o grão (Portero, 2001) diferem entre cultivares, com o período de duração dessa temperatura crítica, com as variações diurnas, e com o estado fisiológico das plantas (Yoshida, 1981; Krishnan *et al.*, 2011).

A temperatura influencia a produtividade do arroz, nomeadamente, o afilhamento, a formação de espiguetas e a maturação do grão (Fig. 3), afetando a altura das plantas, o número de filhos, a produção de biomassa, e influenciando também a duração do ciclo cultural (Yoshida, 1981; Krishnan *et al.*, 2011).

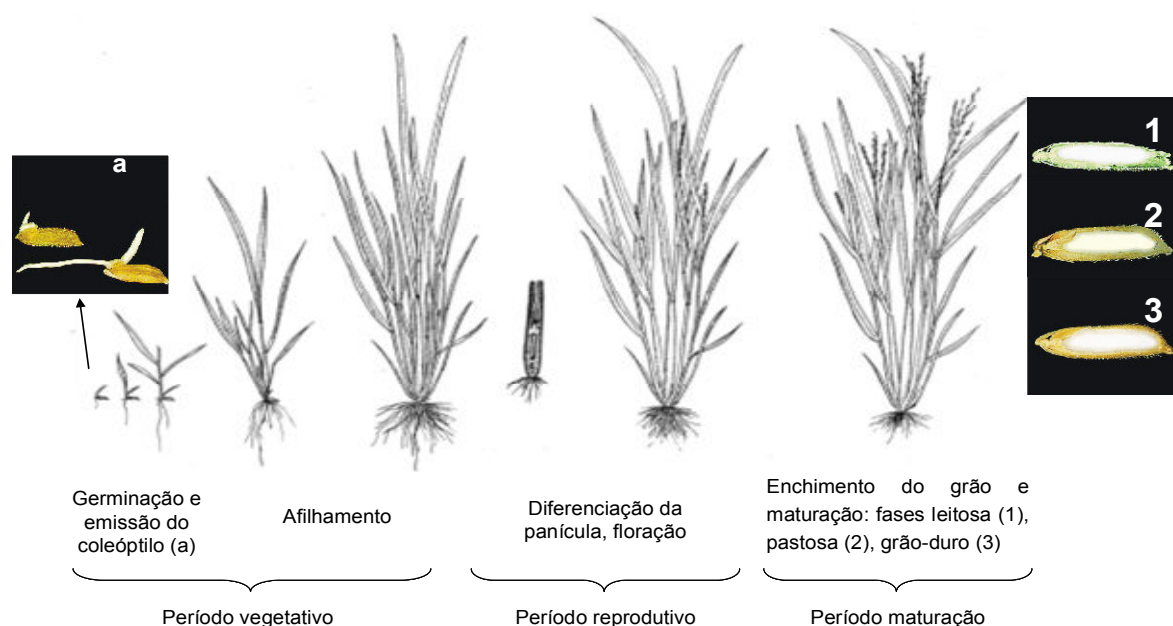


Fig. 3. Ciclo vegetativo da planta do arroz. (Fonte: Adaptado de Helms & Bernhardt, 2000; <http://irri.org>).

As elevadas temperaturas podem provocar problemas na germinação e na emergência das plântulas (Krishnan *et al.*, 2011). A temperatura ótima para a germinação do arroz encontra-se entre os 20 e 35 °C (Yoshida, 1981). A germinação é bastante influenciada pela temperatura. Em presença de temperaturas baixas, a germinação processa-se muito lentamente, podendo ter uma duração superior a um mês. Também o crescimento das plântulas é muito sensível à temperatura na primeira semana pós-germinação (Krishnan *et al.*, 2011). Na presença de temperaturas baixas, a radícula desenvolve-se mais lentamente que o coleóptilo; na presença de temperaturas elevadas, observa-se o oposto. A maior percentagem de sobrevivência das plântulas verifica-se com um desenvolvimento semelhante entre a parte aérea e radicular (Portero, 2001).

Na fase reprodutiva, desde o início da formação de panícula até ao final da floração, as baixas temperaturas podem causar esterilidade das espiguetas. A persistência de dias frios e chuvosos no início do espigamento podem atrasar a floração. O frio também pode induzir esterilidade durante a floração atrasando a abertura das flores e inibindo a fecundação. No espigamento, podem-se observar as glumas brancas, em vez da característica coloração verde, e conseqüente aumento da percentagem de grãos vazios (Portero, 2001). Na floração, a temperatura ótima deve situar-se entre os 22 – 24 °C. Na maturação do grão a temperatura mínima exigida é cerca de 19 °C (ORIVÁRZEA, 2006).

O período mais sensível corresponde ao emborrachamento (dez dias antes do espigamento), quando se formam os grãos de pólen. Este dano pode ter origem nas temperaturas prolongadas (5 – 6 h) inferiores a 11 – 15 °C. Calor excessivo durante a fase de maturação do grão pode também impedir o seu enchimento completo (Portero, 2001).

As temperaturas críticas mínimas e máximas, normalmente abaixo de 20 °C e acima de 30 °C, respetivamente, variam com as fases de desenvolvimento da cultura (Quadro 5).

Quadro 5. Temperaturas ótimas e críticas (°C) para a planta do arroz

| Fases de desenvolvimento             | Temperatura (°C) |         |        |
|--------------------------------------|------------------|---------|--------|
|                                      | Ótima            | Crítica |        |
|                                      |                  | Mínima  | Máxima |
| Germinação                           | 20 – 35          | 10      | 45     |
| Emergência de plântula               | 25 – 30          | 12 – 13 | 35     |
| Enraizamento                         | 25 – 28          | 16      | 35     |
| Desenvolvimento das primeiras folhas | 31               | 7 – 12  | 45     |
| Afilhamento                          | 25 – 31          | 9 – 16  | 33     |
| Diferenciação da panícula            | -                | 15 – 20 | 38     |
| Floração                             | 30 – 33          | 22      | 35     |
| Maturação                            | 20 – 25          | 12 – 18 | 30     |

(Fonte: Yoshida, 1981; Krishnan *et al.*, 2011).

A temperatura do ar e da lâmina de água são fatores chave para o desenvolvimento do arroz. Modificações na altura da lâmina de água são usadas para controlar as variações da temperatura do ar, verificadas durante o ciclo cultural do arroz, especialmente causadas pelo arrefecimento noturno (Pereira, 1989; Portero, 2001; Ferrero, 2007).

### 2.2.2.2. Radiação solar

As plantas sintetizam os açúcares que necessitam através da fotossíntese. Para realizar a fotossíntese, a planta necessita de luz, água e CO<sub>2</sub>, assim como uma temperatura adequada e boa nutrição. A maioria dos glúcidos armazena-se no grão dos cereais, sob a forma de amido. Além da fotossíntese, a intensidade luminosa influencia também outros processos fisiológicos, como sejam a transpiração da planta e a absorção radicular da água e nutrientes, principalmente o N (Portero, 2001).

À semelhança da temperatura, as necessidades de radiação solar na cultura de arroz, diferem com os estados fenológicos da planta. Durante o período vegetativo, a radiação solar afeta ligeiramente o desenvolvimento da planta. Durante as primeiras 3 - 4 semanas, as necessidades de luz são menores. No entanto, a ausência de luz após a formação do coleóptilo provoca um alongamento excessivo da plântula. Posteriormente, a luz contribui menos do que a temperatura no grau de afilhamento e altura das plantas. O período de maior necessidade de luz situa-se durante a diferenciação da panícula até à fase de grão pastoso (Portero, 2001).

No período reprodutivo, a radiação influencia o número de espiguetas, ou seja, a potencial produtividade. No período de maturação, o ensombramento reduz consideravelmente a produção e enchimento dos grãos (Yoshida, 1981).

### 2.2.3. Água

No caso particular da cultura do arroz, a água desempenha um papel preponderante, nomeadamente na regulação térmica da rizosfera, no auxílio ao combate às infestantes, pragas e doenças, intervindo no crescimento e desenvolvimento da cultura, e ajudando na formação de um

estado higrométrico do ar favorável. A substituição do ar pela água nos poros do solo contribui para aumentar a capacidade calorífica deste, uma vez que a capacidade calorífica da água é cerca de 23 vezes superior à do ar (Pereira, 1989). Lâminas de água elevadas permitem, em geral, maior estabilidade térmica diária (Pereira, 1989; Portero, 2001), mas promovem um consumo exagerado de água e podem potenciar maiores perdas de CH<sub>4</sub> (Neue, 1993; Wassmann & Dobermann, 2006).

A altura da planta varia na razão direta da altura da lâmina de água. Deste modo, uma altura da lâmina de água superior a 15 cm, sobretudo nas fases iniciais, além de prejudicar a emergência, favorece o crescimento excessivo das plantas, tornando-as menos resistentes à acama (Pereira, 1989; Kende *et al.*, 1998).

O alagamento é importante desde as fases de encanamento (AAVM, 2010; Figueiredo *et al.*, 2011). Em climas temperados e latitudes de 30 - 45°, a manutenção constante do alagamento permite a obtenção de produções da ordem das 8-12 t ha<sup>-1</sup> (Mikkelsen *et al.*, 1995), superiores à média nacional (6 t ha<sup>-1</sup>).

Na fase de diferenciação da panícula, quanto mais alta for a lâmina de água, maior será a percentagem de flores estéreis (Pereira, 1989).

### **2.3. Azoto: o principal nutriente na cultura do arroz**

O azoto é o quarto elemento mineral mais abundante na matéria seca das plantas, depois do carbono, oxigénio e hidrogénio. O azoto é responsável pela formação dos aminoácidos, ácidos nucleicos, clorofila, entre outros, sendo usualmente adquirido pelas plantas em grande quantidade, mais do que qualquer outro elemento. Este nutriente estimula o rápido crescimento da planta de arroz (aumenta a altura e o número de filhos), a área foliar, o número de espiguetas por panícula, a percentagem de enchimento das espiguetas por panícula e a qualidade da proteína no grão (Dobermann & Fairhurst, 2000; McNeill & Unkovich, 2007). Por estes motivos, o N é o nutriente mais limitante da produção. A sua gestão na cultura do arroz é difícil, especialmente nos solos alagados, dificultando a maximização da sua utilização pela planta (Mikkelsen *et al.*, 1995), e está diretamente relacionada com a gestão da água, com o período de aplicação do N, com a fonte e doses de N e com as transformações químicas que ocorrem no solo após a sua aplicação (De Datta, 1981; Carranca, 1996, 2000; Mengel & Kirkby, 2001; De Varennes, 2003; Fageria *et al.*, 2003; Ladha *et al.*, 2005; Fageria, 2009).

Em relação às necessidades azotadas da planta, estas encontram-se relacionadas com os níveis de produtividade da cultura, que por sua vez, dependem da cultivar, do tipo de solo, do clima, particularmente, a radiação solar e a temperatura, do teor de água e da disponibilidade de outros nutrientes (Kropff *et al.*, 1993).

O período de maior exigência em N é durante o afilhamento e o alongamento dos entrenós (Bajwa *et al.*, 2010; Figueiredo *et al.*, 2011), ou entre a formação da panícula e início da maturação do grão (Mikkelsen *et al.*, 1995). As principais razões para a deficiência deste nutriente na planta são as perdas por lixiviação, desnitrificação, volatilização, erosão do solo e escoamento superficial. Acrescenta-se ainda, o N que é imobilizado pelos microrganismos do solo, bem como o que é “fixado”

nos minerais de argila expansivos do tipo 2:1 (ilite > vermiculite > esmectite), provocando uma deficiência temporária do elemento (Carranca, 1996, 2000; De Varennes, 2003).

### **2.3.1. Dinâmica do N nos arrozais**

A melhoria da eficiência da utilização do azoto (EUN) pelo arroz é um importante objetivo a atingir em sistemas de produção sustentáveis. Entende-se aqui por EUN, a percentagem de N do fertilizante que é recuperado pela cultura (RE). Várias práticas devem ser realizadas para otimizar as necessidades azotadas da cultura, minimizando, simultaneamente, as perdas para fora do ecossistema solo-planta. O sucesso na gestão do N nos solos alagados para produção de arroz requer uma compreensão das relações entre o desenvolvimento da planta, as transformações químicas e biológicas dos fertilizantes (minerais e orgânicos) e do próprio N endógeno no solo, as propriedades físico-químicas do solo e a gestão da água (Fageria *et al.*, 2003).

O cultivo de arroz com recurso ao alagamento, está sujeito a ciclos alternados de aerobiose e anaerobiose. Dum modo geral, em Portugal, o solo é alagado antes da sementeira e interrompido para favorecer o enraizamento das plântulas e para proceder a algumas práticas culturais (tratamentos fitossanitários, normalmente para controlo de infestantes) (Figueiredo *et al.*, 2011). Finalmente, o solo volta a ser drenado antes da maturação, para favorecer a mobilização do N na planta para o grão, aumentar o fornecimento de O<sub>2</sub> às raízes, retardando a sua senescência e permitir o fornecimento de citocinina (hormona de crescimento vegetal) à parte aérea da planta (Mengel & Kirkby, 2001).

O alagamento do solo, com uma lâmina de água entre 5-20 cm, diminui a difusão de O<sub>2</sub> à superfície do solo e reduz a ocorrência de transformações aeróbias abaixo dessa camada superficial de terra (1 - 2 cm), em contacto com a lâmina de água (Mikkelsen, 1987; Mikkelsen *et al.*, 1995). Abaixo desta camada de solo oxigenada, o solo apresenta condições de anaerobiose, exceto na rizosfera, próximo das raízes, onde o O<sub>2</sub>, transportado através do aerênquima (modificação do córtex com formação de grandes espaços acessíveis aos gases), se difunde, por gradiente, entre o interior da raiz da planta de arroz e o solo (Yoshida, 1981; Holzschuh *et al.*, 2010; Gowda *et al.*, 2011). O aerênquima também é responsável pela difusão de parte do CH<sub>4</sub>, emitido nos campos de arroz, para a atmosfera (Wassmann & Aulakh, 2000), assim como de óxido de azoto (N<sub>2</sub>O) (Yan *et al.*, 2000). A nutrição da planta influencia o desenvolvimento do aerênquima, bem como a exsudação da raiz, e deste modo o balanço das emissões destes GEEs (Wassmann & Dobermann, 2006; Baruah *et al.*, 2010). Devido à variação do volume do aerênquima entre cultivares, a quantidade de O<sub>2</sub> libertado pelas raízes pode variar e influenciar o desenvolvimento de microrganismos aeróbios na rizosfera. Com o desenvolvimento da planta perde-se a capacidade de transportar o O<sub>2</sub>, pelo que as raízes mais profundas (na camada mais redutora do solo) morrem e formam-se novas raízes na camada superficial (camada oxidada) que dominam a partir da floração (De Varennes, 2003).

O azoto orgânico resultante, por exemplo, da incorporação dos resíduos da cultura anterior (palha de arroz) no solo é mineralizado (1) produzindo o N-amoniaco (N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) (Fig. 4). Em condições aeróbias o NH<sub>4</sub><sup>+</sup> sofre nitrificação (2), por ação das bactérias nitrificantes, aeróbias obrigatórias. Este

processo pode ocorrer quando o solo está drenado ou na rizosfera, em resultado da libertação de  $O_2$  acumulado nas células do aerênquima das raízes e caule mergulhado na lâmina de água.

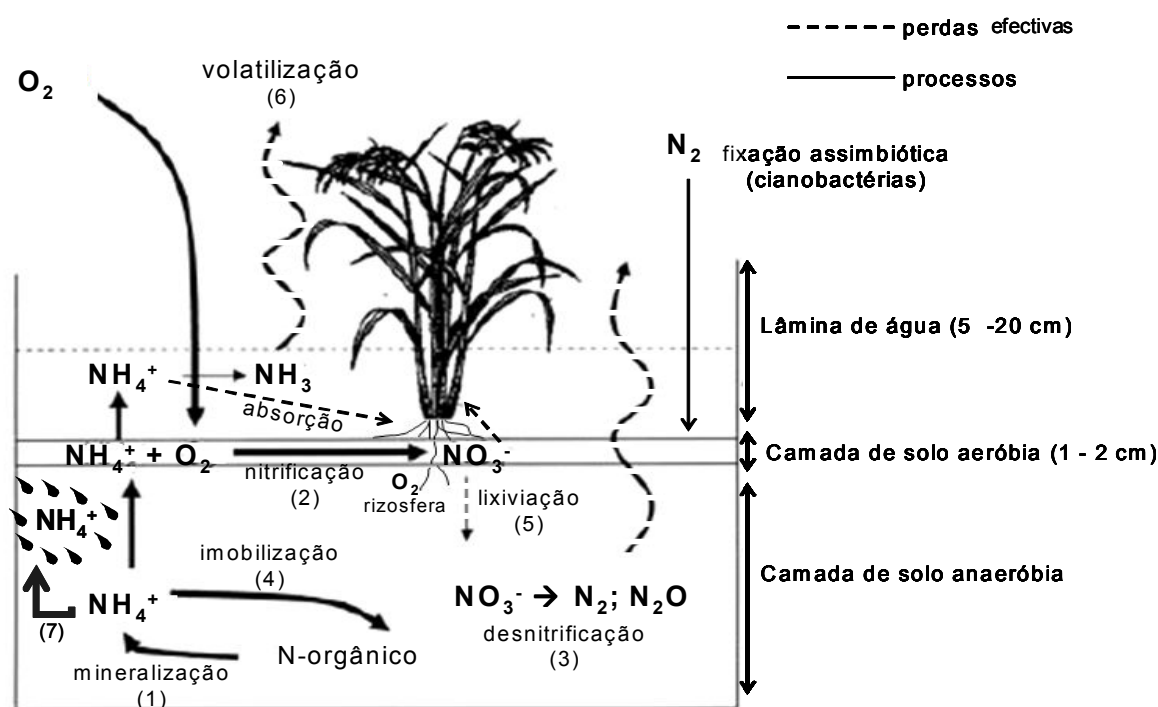


Fig. 4. Dinâmica do N, em solos alagados de produção de arroz. (Fonte: Adaptado de Carranca, 2000; Espinoza *et al.*, 2005).

Após o alagamento, o  $O_2$  presente nos poros do solo é substituído por água, provocando condições de anaerobiose total, ou parcial. Dá-se então, a desnitrificação (3) por ação das bactérias desnitrificantes heterotróficas (desnitrificação biológica), ou como resultado duma reação química (desnitrificação química). No caso da desnitrificação biológica, as bactérias, principalmente dos géneros *Alcaligenes*, *Bacillus* e *Pseudomonas*, reduzem o ião nitrato a  $N_2O$  e azoto molecular ( $N_2$ ). A desnitrificação química, ou quimiodesnitrificação, corresponde à redução espontânea e ao resultado de reações com compostos orgânicos (Carranca, 1996, 2000; De Varennes, 2003). A desnitrificação, nos campos de arroz é uma importante fonte de emissão de  $N_2O$  para atmosfera. No entanto, a contribuição real do cultivo de arroz para as emissões globais deste GEE é desconhecida (Wassmann & Dobermann, 2006). A alternância alagamento/drenagem pode reduzir as emissões de  $CH_4$ , mas potencia as emissões de  $NO_x$  (Figueiredo *et al.*, 2011).

Em Portugal, no ano de 2007, o setor agrícola emitiu <10% do total de GEEs comparativamente com o ano de 1990, dos quais, 34% na forma de  $CH_4$  de explorações pecuárias, especialmente devido à fermentação entérica dos ruminantes (um aumento de 14% relativamente a 1990), ao cultivo do arroz por alagamento e à adição de resíduos orgânicos ao solo, e 64% na forma de óxidos de N resultantes da fertilização azotada (33%), da cultura do arroz por alagamento, da aplicação ao solo de resíduos orgânicos, da rega localizada, e do próprio solo, pela presença de organismos vivos como as minhocas (Carranca, 2010).

No alagamento, o  $N_{\text{orgânico}}$  continua a ser mineralizado lentamente, em condições de anaerobiose, porque os microrganismos responsáveis pela mineralização são aeróbios facultativos, podendo permanecer no solo sob a forma de  $\text{NH}_4^+$ , que é utilizável pela planta do arroz. O  $N_{\text{orgânico}}$  que é mineralizado, desempenha um papel fundamental na nutrição azotada do arroz (Carranca, 2000; Espinoza *et al.*, 2005).

O azoto amoniacal pode ficar temporariamente indisponível no solo, não sendo considerado como perda. Esta indisponibilidade temporária pode ser biológica ou física. No primeiro caso, o  $\text{NH}_4^+$  é assimilado pelos microrganismos (4), sendo rapidamente mineralizado e nitrificado (em presença de  $\text{O}_2$ ) após a morte destes (Carranca, 1986; 1996; 2000; De Varennes, 2003). Na imobilização física, o  $\text{NH}_4^+$  pode ser “fixado”, nos minerais argilosos, expansivos, do tipo 2:1 (7) que muitas vezes constituem a argila dos solos (Carranca, 1986; 1996; 2000; De Varennes, 2003).

As perdas efetivas do N durante o ciclo cultural do arroz (Fig. 4) para fora do ecossistema solo-planta podem ocorrer por lixiviação de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) (5), volatilização do  $\text{NH}_3$  (6), escorrimento superficial, nitrificação incompleta ou desnitrificação (3) (Mikkelsen *et al.*, 1995; Carranca, 2000; Portero, 2001; Fageria *et al.*, 2003). Estas perdas contribuem para um uso do N pela cultura do arroz, da ordem dos 20 - 60% (Cassman *et al.*, 1993; Ladha *et al.*, 2005; El-Sharkawi *et al.*, 2007). No entanto, comparativamente com os resultados obtidos por vários autores, incluindo outras culturas, acima dos 50% a EUN poderá ser considerada elevada. O intervalo de valores mais baixos da EUN situa-se também dentro dos valores determinados por Carranca (2010) para outras culturas, incluindo o trigo (*Triticum aestivum* L.).

As perdas de N por via gasosa, dos campos de arroz, são muitas vezes superiores a metade do nutriente aplicado (Mikkelsen *et al.*, 1995; Dobermann & Fairhurst, 2000), isto é, podem representar a quase totalidade das perdas de N. Mas podem ser menores, da ordem dos 5 – 10%, no caso do cultivo de arroz por alagamento permanente (Fillery & Vlek, 1982). O processo de volatilização do  $\text{NH}_3$  é influenciado, diretamente, pelo teor de  $\text{NH}_4^+$  na lâmina de água, o pH do solo e água e a temperatura da água, velocidade do vento e altura da lâmina de água (De Datta, 1987; Mikkelsen *et al.*, 1995). No processo de desnitrificação, o  $\text{NO}_3^-$  é reduzido por diferentes etapas a óxido nítrico (NO),  $\text{N}_2\text{O}$  e  $\text{N}_2$ , que são libertados para a atmosfera (Reddy & Patrick, 1986; Carranca, 1996, 2000). O azoto molecular ( $\text{N}_2$ ) é a forma mais favorável de perda do N por desnitrificação, uma vez que é estável na atmosfera e não faz parte dos GEEs. Já o  $\text{N}_2\text{O}$  é altamente poluente, mais potente como GEE que o  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$  (Vitousek *et al.*, 1997; De Varennes, 2003). Fatores como a disponibilidade de MO, C lábil, pH próximo da neutralidade e ciclos alternados de arejamento e alagamento, influenciam a desnitrificação (Mikkelsen *et al.*, 1995).

### **2.3.2. Fertilização azotada**

Cada nutriente tem um papel específico nos processos fisiológicos das plantas e a sua absorção, acumulação e função na planta dependem dum adequado fornecimento do elemento.

Para uma boa gestão do N, é necessário estimar as necessidades azotadas da cultura e a disponibilidade em N do solo e água de rega. A otimização da eficiência do uso do nutriente pela cultura do arroz é, pois, fundamental. Em média, para a produção de uma tonelada de grão de arroz

são necessários 20 kg de N (Roy *et al.*, 2006). Neste trabalho, define-se eficiência agronómica (EA), como a relação entre a produção do grão ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) por unidade de fertilizante aplicado ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) (Carranca, 2010). Também neste estudo se utiliza o conceito de eficiência de recuperação (RE) do nutriente pela planta, como sendo o teor de N na planta ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) em relação ao fertilizante aplicado ( $\text{kg N ha}^{-1}$ ) (Roberts, 2008; Carranca, 2010).

Os fertilizantes azotados são adicionados, normalmente, em pelo menos duas aplicações. A primeira é, geralmente, em adubação de fundo, e representa cerca de 50% do total, os outros restantes 50% são aplicados em cobertura, ao afilhamento, apesar de Mikkelsen *et al.* (1995) referirem que o período de maior exigência em N situa-se entre a formação da panícula e o início da maturação do grão.

A deficiência de N pode ser facilmente corrigida, em adubação de cobertura, sendo a resposta da planta rapidamente visível, obtendo-se em 2-3 dias um aumento da biomassa e da concentração de N na planta (Bajwa *et al.*, 2010).

### **2.3.2.1. Fontes azotadas na cultura do arroz por alagamento**

Para o cultivo de arroz por alagamento recomenda-se a aplicação de N na forma amoniacal ou ureica (Carranca, 1996, 2000; De Varennes, 2003), visto que o N fornecido na forma nítrica é perdido rapidamente por lixiviação ou desnitrificação, após o alagamento do solo. O  $\text{NH}_4^+$  é um catião que liga ao complexo de troca do solo, enquanto que o  $\text{NO}_3^-$  (anião) é móvel no solo, não sendo adsorvido. O ião amoniacal pode também ser “fixado” nos minerais argilosos expansivos, ficando protegido da nitrificação, funcionando como um adubo de libertação lenta.

O sulfato de amónio e a ureia são, geralmente, considerados relativamente eficientes fontes azotadas para o arroz. O sulfato de amónio pode ser mais eficiente quando aplicado em solos alcalinos (porque acidifica os solos) ou quando o N não é incorporado no solo. No entanto, devido às condições redutoras do solo, que favorecem a redução do ião sulfato a sulfídrico, tóxico para as plantas, não é recomendável a sua utilização na cultura do arroz (De Varennes, 2003).

A ureia, após aplicação ao solo, está sujeita a hidrólise formando  $\text{N-NH}_3$ , que pode ser perdido por volatilização se não for imediatamente utilizado pela planta, ou lixiviado (Carranca, 2000; De Varennes, 2003). De acordo com alguns autores citados por Wassmann & Doberman (2006), as perdas de  $\text{NH}_3$  no cultivo de arroz por alagamento podem ser superiores a metade da ureia aplicada na fertilização da cultura. No que se refere à contribuição deste fertilizante para a emissão de  $\text{CH}_4$ , em estudo realizado em Itália, a ureia não contribuiu para a sua emissão (Dan *et al.*, 2001).

As cianobactérias, organismos livres do solo ou água, ou associados a algas e fixadores assimbióticos do  $\text{N}_2$  atmosférico são importantes na produção de arroz por alagamento podendo capturar  $30 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  (Roger, 1997; Smil, 1999), que fica retido no solo (El-Sharkawi *et al.*, 2007), diminuindo as necessidades azotadas da planta por outras formas (Dobermann & Fairhurst, 2000).

### 2.3.2.2. Épocas de aplicação dos fertilizantes azotados

As necessidades azotadas da cultura do arroz são variáveis ao longo do ciclo cultural (Fageria *et al.*, 2003; Figueiredo *et al.*, 2011). A absorção do N encontra-se relacionada com o crescimento da planta (Mikkelsen *et al.*, 1995). Assim, é fundamental o conhecimento sobre as várias fases do desenvolvimento do arroz (Fig. 3) e suas exigências azotadas (Fageria *et al.*, 2003). Verifica-se que a curva-padrão de absorção do N, se assemelha com a curva de crescimento (Fig. 5), demonstrando a relação entre estas duas variáveis (Mikkelsen *et al.*, 1995).

A escolha do momento correto para a aplicação do fertilizante azotado e das doses de N mais adequadas é importante para um uso eficiente do nutriente pela planta. Entre a emergência e início do afilhamento ocorre um aumento quase linear no peso seco das plantas (De Datta, 1981). Após o início do afilhamento e até ao início do alongamento do colmo, o peso seco aumenta exponencialmente, em virtude do aumento do número de filhos e alargamento das folhas (Fageria *et al.*, 2003), mas o teor de N na planta aumenta também, quase linearmente nesta fase. O N absorvido pela planta no período compreendido entre o afilhamento e a iniciação da panícula tende a aumentar o número de filhos e panículas (De Datta, 1981).

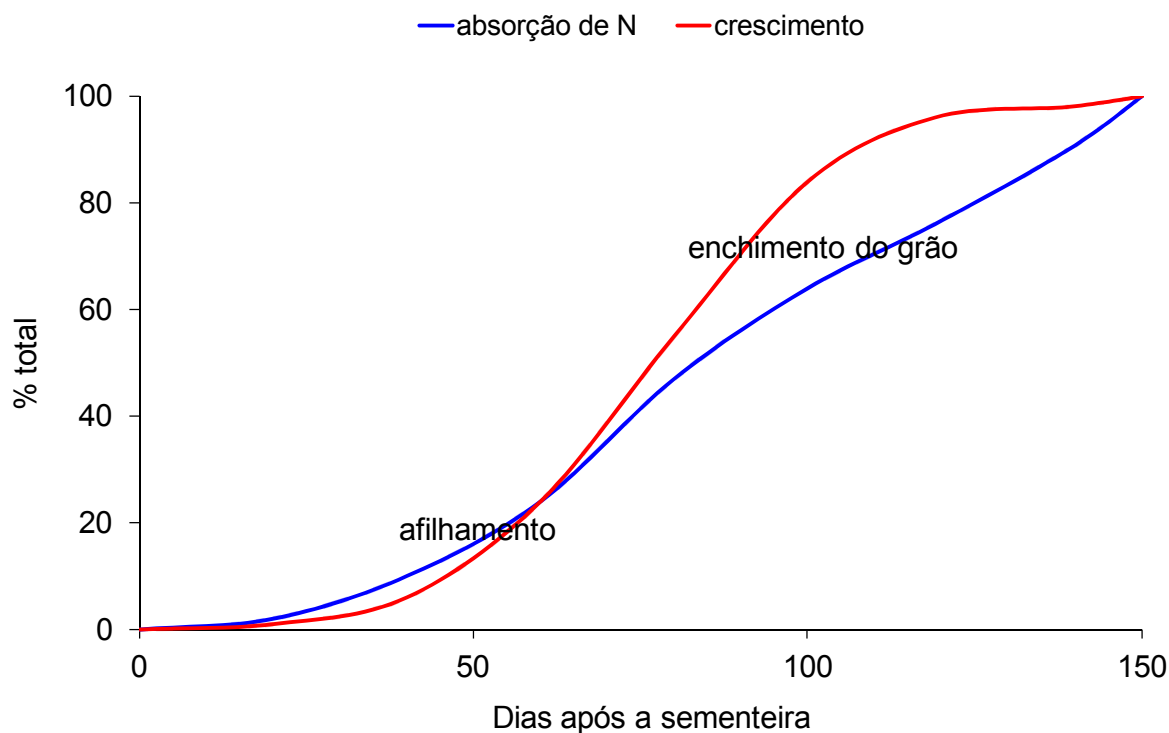


Fig. 5. Relação entre a curva de crescimento e a curva de absorção de N. (Fonte: Adaptado de Mikkelsen *et al.*, 1995).

De acordo com Dobermann & Fairhurst (2000), cerca de metade do N absorvido pelo arroz é acumulado na parte aérea da planta na fase de formação da panícula, diminuindo após a fase de floração. Da observação da Fig. 5, o período entre o afilhamento e o enchimento do grão parece ser o mais exigente em N. O azoto armazenado nos tecidos da planta é posteriormente translocado para o grão. Até à fase de maturação do grão, as plantas terão absorvido, 75 - 90% do total das suas

necessidades azotadas (Fageria *et al.*, 2003). Na maturação, cerca de dois terços do N absorvido encontra-se no grão (Mikkelsen *et al.*, 1995).

O azoto aplicado 3 - 4 semanas antes da floração pode afetar o número de grãos cheios, mas apresenta um efeito mínimo sobre o tamanho destes. O período entre a formação da panícula e início da maturação do grão é o mais exigente em N (Mikkelsen *et al.*, 1995). Uma aplicação tardia de N, durante a floração, retarda a senescência foliar, mantendo a fotossíntese durante o enchimento do grão, melhorando esse enchimento, mas apenas deve ser efetuada em plantas saudáveis e com bom potencial produtivo (Dobermann & Fairhurst, 2000). Doutro modo, pode ocorrer a acama ou o surgimento de pragas e doenças.

As deficiências em N ocorrem, frequentemente, nas fases críticas de crescimento, isto é, ao afilhamento e iniciação da panícula, quando as necessidades azotadas são maiores (Fig. 5). A deficiência em N resulta em reduzido afilhamento, plantas e folhas pequenas e conseqüente redução do número de grãos (Dobermann & Fairhurst, 2000). A deficiência azotada observa-se primeiro na base das folhas mais velhas, em virtude da mobilidade do nutriente na planta, sendo mobilizado para as folhas mais jovens e órgãos em crescimento (Portero, 2001).

### 3. Material e Métodos

#### 3.1. Localização dos ensaios

Os ensaios para avaliação da dinâmica do N em solos alagados de produção de arroz e eficiência do uso do N pela cultura, foram instalados, em 2010, em duas parcelas (A e B) do Centro Operativo e Tecnológico do Arroz (COTArroz), no Paul de Magos (Latitude 39° 02' 21,40" N, Longitude 8° 44' 25,98" W; altitude de 18 m) localizado em Salvaterra de Magos, distrito de Santarém, na região de Lisboa e Vale do Tejo (Fig. 6).

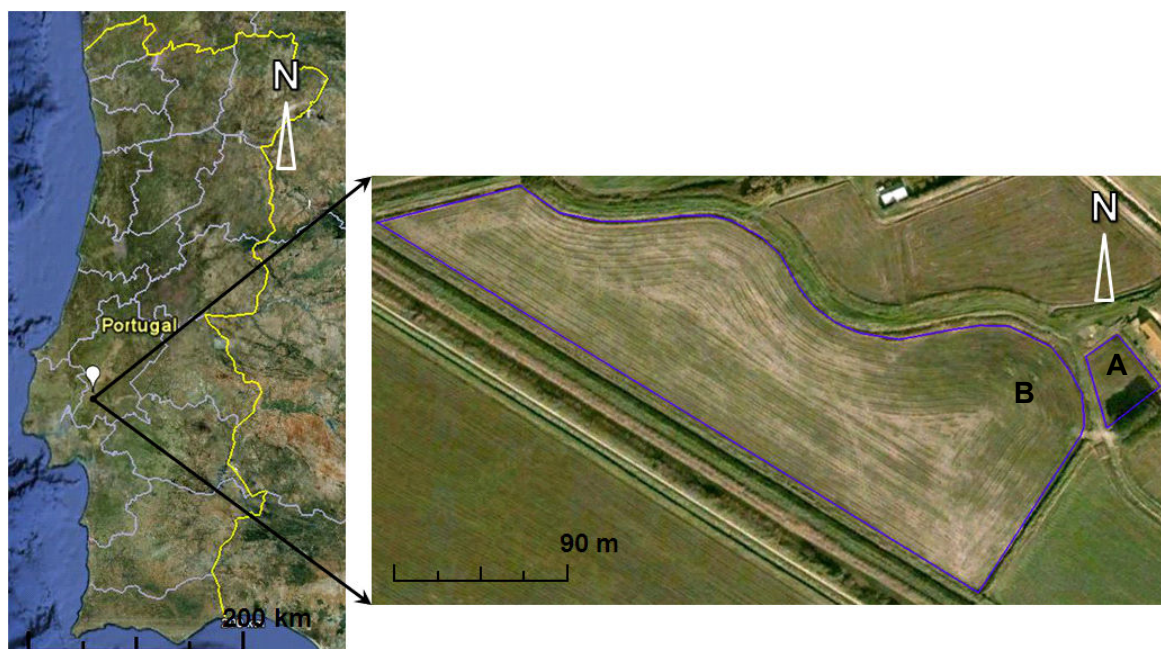


Fig. 6. Localização das parcelas e locais de ensaios, solos A e B. (Fonte: Adaptado de *Google Earth*, 30/01/2011).

#### 3.1.1. Delineamento experimental

Os ensaios foram instalados nas duas parcelas A e B (Fig. 6), em blocos completamente casualizados, com três repetições. Cada talhão de ensaio media 3,0 m<sup>2</sup> (1,5 m x 2,0 m). Deixaram-se intervalos sem plantas de 0,50 m a separar os talhões.

#### 3.1.2. Caracterização climática e edáfica

##### 3.1.2.1. Clima

Visando uma mais completa caracterização do local de estudo, apresentam-se as normais climatológicas da estação da Bacia Hidrográfica do rio Tejo, localizada em Santarém (Fig. 7) (Latitude 39° 15' N, Longitude 08° 54' W, altitude: 54 m), referentes ao período 1971 – 2010.

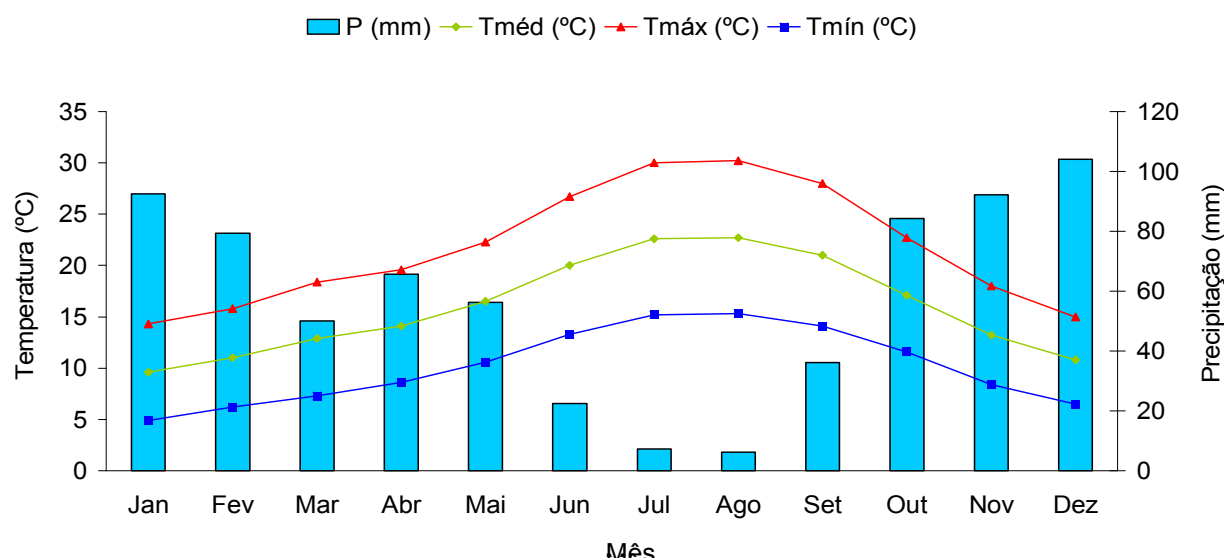


Fig. 7. Normais climatológicas (temperatura e precipitação) no período de 1971 - 2000 na estação meteorológica de Santarém (IM, 2011). (P=precipitação acumulada; Tmín=média das temperaturas mínimas mensais; Tméd=temperatura média mensal; Tmáx=média das temperaturas máximas mensais).

Durante o ciclo cultural do arroz, de abril a outubro, a temperatura média na estação meteorológica de Santarém oscilou entre os 14,1 e 22,7 °C, com a temperatura mínima variando entre 8,6 e 15,3° C e a temperatura máxima entre 19,6 e 30,2 °C (Fig. 7).

No que se refere à precipitação, e de acordo com as características do clima temperado Mediterrâneo, esta é mais concentrada nos meses de outono/inverno, sendo quase nula nos meses de verão (Fig. 7).

No local do presente estudo, encontra-se uma estação agrometeorológica automática, propriedade da Associação de Regantes e Beneficiários do Vale do Sorraia (Latitude 39° 2' 20,15" N, Longitude 8° 44' 25,7" W, altitude 18 m). Na figura seguinte encontram-se os dados registados no local de ensaio, durante o ciclo cultural do arroz, no ano de 2010.

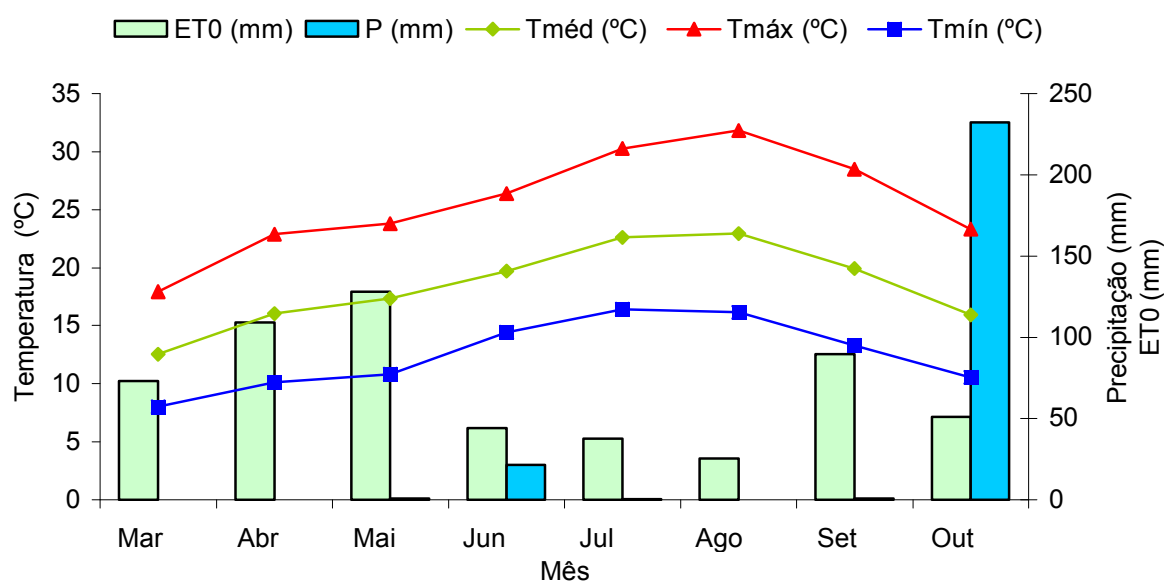


Fig. 8. Distribuição da temperatura média mensal (Tméd), máxima mensal (Tmáx) e mínima mensal (Tmín) e da precipitação acumulada mensal (P) e evapotranspiração mensal (ET0), em Salvaterra de Magos (2010).

Comparando os valores observados na estação meteorológica de Santarém (Fig. 7) com os verificados no local do ensaio durante o período de estudo (Fig. 8), poderemos dizer que se encontram dentro dos valores normais para a época.

### **3.1.2.2. Solo**

Os campos selecionados para a realização dos estudos localizaram-se numa região onde os solos predominantes são classificados, segundo a WRB (*World Reference Base for Soil Resources*) como Fluvisolos [Fluvisols] (IUSS-ISRIC-FAO, 2006), isto é, solos recentes de aluvião. Contudo, a grande influência humana, nomeadamente, o uso agrícola, permite o seu enquadramento nos Antrosolos [Anthrosols] (IUSS-ISRIC-FAO, 2006).

### 3.2. Operações culturais

As operações culturais realizadas em ambos os solos neste estudo foram muito semelhantes (Fig. 9).

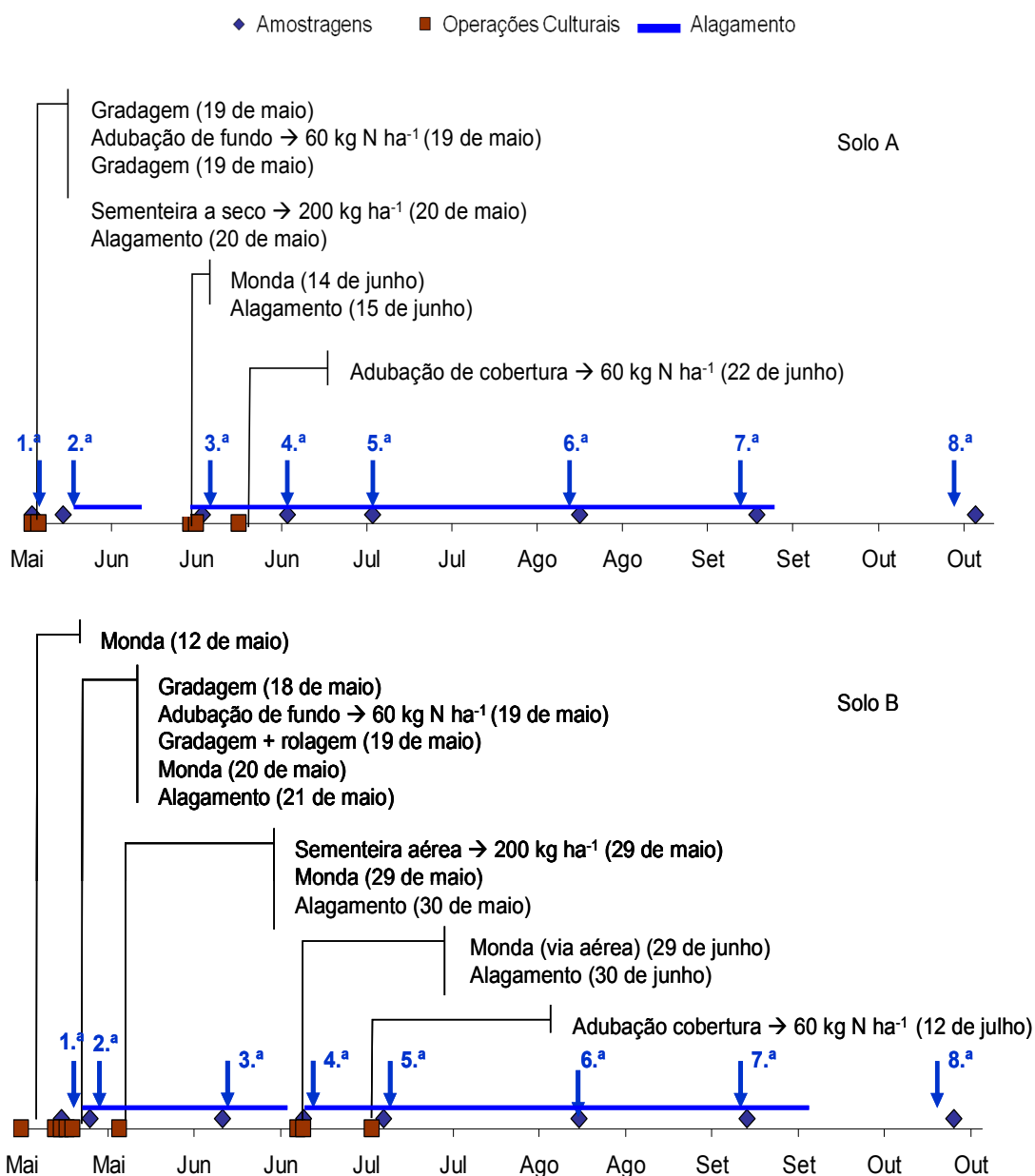


Fig. 9. Operações culturais efetuadas nos solos A e B, e identificação das datas de amostragem de terra e água (2010).

No Quadro 6 encontra-se a identificação das diferentes fases do ciclo cultural do arroz nos dois solos em estudo, no momento da colheita de amostras de terra e água.

Quadro 6. Fases do ciclo cultural do arroz observadas nas datas de amostragem de terra e água, no solo A e B

| Data        | Fase do ciclo cultural    |                                      |
|-------------|---------------------------|--------------------------------------|
|             | Solo A                    | Solo B                               |
| 19 maio     | 1 dia antes da sementeira | -                                    |
| 24 maio     | Germinação/emergência     | 5 dias antes da sementeira           |
| 16 junho    | Início afilhamento        | 4 <sup>a</sup> /5 <sup>a</sup> folha |
| 30 junho    | Início da panícula        | Início afilhamento                   |
| 14 julho    | Espigamento               | Afilhamento                          |
| 17 agosto   | Floração                  | Floração                             |
| 15 setembro | Grão leitoso/pastoso      | Grão leitoso/pastoso                 |
| 21 outubro  | Grão maduro               | Grão maduro                          |

### 3.2.1. Mobilização do solo

A mobilização dos solos dos ensaios foi idêntica à normalmente praticada na região do Vale do Tejo, tendo por base a dupla gradagem.

A primeira gradagem permitiu a incorporação, no solo, dos resíduos da cultura anterior (palha de arroz), que se encontravam espalhados à superfície. A segunda gradagem destinou-se à incorporação do adubo, em fundo. No solo B, acrescentou-se uma rolagem ao solo, permitindo homogeneizar o nivelamento do solo, para que a lâmina de água ficasse uniforme e relativamente baixa em toda a área de cultivo.

### 3.2.2. Sementeira

O arroz (*Oryza sativa* L. cv. Aríete) da subespécie *japonica*, foi semeado em ambos os solos A e B. Esta cultivar apresenta um ciclo vegetativo de cerca de 150 dias, e o arroz é classificado, comercialmente, como sendo do tipo longo A (carolino).

A sementeira, no solo A, ocorreu a 20 de maio de 2010, com os canteiros secos, e efetuou-se manualmente. No solo B, a sementeira teve lugar em 29 de maio, por via aérea, com os canteiros alagados. A densidade de sementeira foi igual em ambos os casos, utilizando-se 200 kg ha<sup>-1</sup> de semente.

A sementeira de arroz efetua-se, tradicionalmente, a lanço, em Portugal, e regra geral mecanicamente, com recurso a um distribuidor centrífugo, ou por via aérea (Fig. 10), podendo também ser manual. A sementeira realiza-se com os canteiros alagados (lâmina de água 5-10 cm) ou secos. Quando se procede à sementeira com os canteiros alagados, a cariopse (semente) sofre um tratamento prévio, designado por “chumbagem”, que consiste em mergulhar a semente em água, num período de 24 - 48 h, de modo a permitir a absorção de água e conseqüente aumento de peso da semente. Por este meio diminui-se a flutuabilidade da semente, permitindo uma veloz deposição das sementes no solo e a sua rápida germinação.



Fig. 10. Sementeira por via aérea da cultura de arroz, em Salvaterra de Magos (2010).

### **3.2.3. Rega**

A altura da lâmina de água à superfície do solo foi variável ao longo do ciclo cultural do arroz, desde a sementeira até ao período de maturação. O nível de água permaneceu nos 5-10 cm na fase da sementeira. Após a emergência, os canteiros foram drenados, durante 3 a 4 dias, de modo a favorecer o enraizamento das plântulas. O solo foi de novo alagado, com uma lâmina de água de 10 - 20 cm de altura. Ao afilhamento, o nível de água foi mantido baixo. Cerca de 35 a 40 dias após a sementeira, existiu a necessidade de drenar, de novo, os canteiros, para proceder à monda química. Depois da floração, o nível de água permaneceu constante, com 10 a 15 cm de altura até 15 dias antes da colheita.

#### **3.2.3.1. Fertilização**

Nas duas parcelas localizadas em cada um dos dois solos em estudo foram usados, em adubação de fundo, adubos minerais compostos. No solo A, aplicaram-se 300 kg ha<sup>-1</sup> de um adubo ternário (20-8-10), fornecendo ao solo, respetivamente 60, 24 e 30 kg de N, P e potássio (K). No solo B, também foram aplicados 300 kg ha<sup>-1</sup> de adubo, mas neste caso, um adubo binário (20-20-0). Apesar de ter sido aplicada a mesma dose de N que no solo A (60 kg ha<sup>-1</sup>), a quantidade de P foi superior (60 kg ha<sup>-1</sup>).

A adubação de cobertura ocorreu ao início do afilhamento, em 22 de junho no solo A e 12 de julho de 2010 no solo B. Nesta adubação foram aplicados 130 kg ha<sup>-1</sup> de ureia (46% N), tendo sido fornecida a mesma quantidade de N aos dois solos (60 kg ha<sup>-1</sup>) (total de N aplicado nos dois solos: 120 kg N ha<sup>-1</sup>). A fertilização mineral azotada respeitou a prática cultural na exploração agrícola.

### **3.2.4. Proteção fitossanitária**

Os tratamentos fitossanitários realizados na cultura incidiram, exclusivamente, sobre o controlo de infestantes, utilizando-se diversas substâncias ativas (s.a.) para controlo da flora infestante.

No solo A, realizou-se uma monda química 26 dias após a sementeira, recorrendo a um pulverizador acoplado a trator. O canteiro encontrava-se drenado, favorecendo a exposição das infestantes à calda. Recorreu-se a um herbicida com formulação de dispersão oleosa de 20 g l<sup>-1</sup> de penoxsulame (s.a.). A dose aplicada de produto comercial foi de 2 l ha<sup>-1</sup>. No dia seguinte à aplicação do produto procedeu-se ao alagamento do canteiro.

No solo B, antes do início da preparação do terreno, realizou-se uma monda química, recorrendo a um pulverizador montado no trator, utilizando um herbicida sistémico com formulação de solução aquosa com 360 g l<sup>-1</sup> de glosado (s.a.), de modo a eliminar as infestantes que se haviam desenvolvido desde a colheita da campanha anterior. A dose aplicada foi de 3 l ha<sup>-1</sup> de produto comercial. Após a preparação do terreno (segunda gradagem), aplicou-se um herbicida residual com formulação de 250 g l<sup>-1</sup> de oxadiazão (s.a.), para o controlo das infestantes em pré-sementeira, recorrendo novamente ao pulverizador. Aplicou-se uma dose de produto comercial de 1,6 l ha<sup>-1</sup>. O canteiro foi alagado no dia seguinte, e a sementeira ocorreu 8 dias depois. A monda pós-emergência realizou-se 30 dias após sementeira, por via aérea, recorrendo-se a uma mistura de substâncias ativas para controlo da flora infestante. A mistura foi composta por: (1) suspensão concentrada com 400 g l<sup>-1</sup> de bispiribace-sódio (s.a.), numa dose de 0,075 l ha<sup>-1</sup>, (2) um herbicida hormonal de formulação concentrada para emulsão com 420 g l<sup>-1</sup> de ácido ariloxialcanóico (sob a forma de éster isooctílico). A esta mistura adicionou-se um molhante não iónico (solução concentrada com 283 g l<sup>-1</sup> de lauril éter diglicol sulfato de sódio), e foi aplicada na dose de 0,75 l ha<sup>-1</sup>.

## **3.3. Colheita de amostras de terra, água e material vegetal**

### **3.3.1. Colheita das amostras de terra**

Para a caracterização física, química e mineralógica dos dois solos (A e B) em estudo, colheram-se amostras de terra compósitas, em três profundidades (0-20, 20-40 e 40-60 cm). As amostras foram secas ao ar e crivadas a 2 mm, anteriormente à análise, designadamente quanto à textura, caracterização mineralógica, pH<sub>(H<sub>2</sub>O)</sub>, matéria orgânica (MO), e teores de carbono (C) e N totais, bases de troca e acidez titulável. Os resultados foram apresentados nos Quadros 7, 8 e 9.

Em ambos os solos A e B verificou-se uma predominância da fração areia em profundidade. Deste modo, os solos apresentaram uma textura grosseira, que contribuiu para a permeabilidade e arejamento do solo.

A classe textural do solo A classifica-se como areno franca (Gomes & Silva, 1962), com aumento dos teores de limo e argila com a profundidade (Quadro 7). O mineral expansivo predominante na fração argilosa foi a ilite (200-500 g kg<sup>-1</sup>), mas também a vermiculite (<20 g kg<sup>-1</sup>) e a esmectite (20-200 g kg<sup>-1</sup>) (Quadro 9). Quanto à reação, o solo A apresenta-se ligeiramente ácido

(Quadro 7). O teor de MO é baixo, em cada uma das profundidades. A capacidade de troca catiónica é muito baixa na profundidade 0-20 cm, e baixa nas seguintes profundidades. Em relação às bases de troca, os teores de cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), potássio ( $\text{K}^+$ ), magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) e sódio ( $\text{Na}^+$ ) são relativamente baixos.

Quadro 7. Características físicas e químicas do solo A, localizado no Paul de Magos

| Características  | Profundidade (cm) |    |    |              |    |     |                |    |     |
|--|-------------------|----|----|--------------|----|-----|----------------|----|-----|
|  | 0-20              |    |    | 20-40        |    |     | 40-60          |    |     |
| Textura  | areno franca      |    |    | areno franca |    |     | franco arenosa |    |     |
| areia, limo, argila ( $\text{g kg}^{-1}$ )                       | 880               | 40 | 80 | 840          | 50 | 110 | 810            | 60 | 130 |
| $\text{pH}_{(\text{H}_2\text{O})}$                               | 5,1               |    |    | 5,6          |    |     | 5,8            |    |     |
| C total ( $\text{g kg}^{-1}$ )                                   | 6                 |    |    | 5,4          |    |     | 4,9            |    |     |
| MO ( $\text{g kg}^{-1}$ )  | 10                |    |    | 9            |    |     | 9              |    |     |
| N total ( $\text{g kg}^{-1}$ )                                   | 0,6               |    |    | 0,5          |    |     | 0,5            |    |     |
| $\text{Ca}^{2+}$ de troca ( $\text{cmol}_{(+)} \text{kg}^{-1}$ ) | 1,5               |    |    | 2,1          |    |     | 2,5            |    |     |
| $\text{Mg}^{2+}$ de troca ( $\text{cmol}_{(+)} \text{kg}^{-1}$ ) | 0,6               |    |    | 0,8          |    |     | 1,1            |    |     |
| $\text{K}^+$ de troca ( $\text{cmol}_{(+)} \text{kg}^{-1}$ )     | 0,1               |    |    | 0,1          |    |     | 0,1            |    |     |
| $\text{Na}^+$ ( $\text{cmol}_{(+)} \text{kg}^{-1}$ )             | 0,2               |    |    | 0,3          |    |     | 0,4            |    |     |
| Acidez titulável ( $\text{cmol}_{(+)} \text{kg}^{-1}$ )          | 1,6               |    |    | 1,9          |    |     | 1,4            |    |     |
| CTC potencial ( $\text{cmol}_{(+)} \text{kg}^{-1}$ )             | 3,9               |    |    | 5,0          |    |     | 5,4            |    |     |

MO=matéria orgânica; CTC=capacidade de troca catiónica.

Quadro 8. Características físicas e químicas do solo B, localizado no Paul de Magos

| Características  | Profundidade (cm) |    |    |         |    |    |         |    |    |
|--|-------------------|----|----|---------|----|----|---------|----|----|
|  | 0-20              |    |    | 20-40   |    |    | 40-60   |    |    |
| Textura  | areno franca      |    |    | arenosa |    |    | arenosa |    |    |
| areia, limo, argila ( $\text{g kg}^{-1}$ )                       | 900               | 30 | 80 | 950     | 20 | 40 | 970     | 10 | 30 |
| $\text{pH}_{(\text{H}_2\text{O})}$                               | 4,7               |    |    | 3,9     |    |    | 4,4     |    |    |
| C total ( $\text{g kg}^{-1}$ )                                   | 5,9               |    |    | 2,2     |    |    | <1,5    |    |    |
| MO ( $\text{g kg}^{-1}$ )  | 10                |    |    | 4       |    |    | <3      |    |    |
| N total ( $\text{g kg}^{-1}$ )                                   | 0,6               |    |    | 0,2     |    |    | <0,1    |    |    |
| $\text{Ca}^{2+}$ de troca ( $\text{cmol}_{(+)} \text{kg}^{-1}$ ) | 1,9               |    |    | 1,0     |    |    | 0,6     |    |    |
| $\text{Mg}^{2+}$ de troca ( $\text{cmol}_{(+)} \text{kg}^{-1}$ ) | 0,8               |    |    | 0,4     |    |    | 0,3     |    |    |
| $\text{K}^+$ de troca ( $\text{cmol}_{(+)} \text{kg}^{-1}$ )     | 0,1               |    |    | 0,1     |    |    | 0,04    |    |    |
| $\text{Na}^+$ ( $\text{cmol}_{(+)} \text{kg}^{-1}$ )             | 0,2               |    |    | 0,2     |    |    | 0,1     |    |    |
| Acidez titulável ( $\text{cmol}_{(+)} \text{kg}^{-1}$ )          | 1,4               |    |    | 1,3     |    |    | 0,8     |    |    |
| CTC potencial ( $\text{cmol}_{(+)} \text{kg}^{-1}$ )             | 4,5               |    |    | 2,9     |    |    | 2,0     |    |    |

MO=matéria orgânica; CTC=capacidade de troca catiónica.

A classe textural do solo B é também areno franca na camada superficial, apresentando-se arenosa nas profundidades inferiores (Quadro 8). A fração limo+argila era inferior à do solo A, decrescendo com a profundidade. O mineral expansivo mais abundante na fração argilosa é a ilite ( $200\text{-}500 \text{ g kg}^{-1}$ ), mas também a esmectite ( $20\text{-}200 \text{ g kg}^{-1}$ ) (Quadro 9). O solo apresenta uma reação ácida. À semelhança do solo A, o nível de MO é baixo a muito baixo (Quadro 7). A capacidade de troca catiónica é muito baixa, especialmente na profundidade 20-60 cm.

Quadro 9. Características mineralógicas dos solos A e B

| Solo | Profundidade (cm) | E      | V   | EVne  | I (g kg <sup>-1</sup> ) | C   | Imve | Q   | F   |
|------|-------------------|--------|-----|-------|-------------------------|-----|------|-----|-----|
| A    | 0 – 20            | 50-200 | <20 | <20   | 200-500                 | <20 | >500 | <20 | <20 |
|      | 20 – 40           | 20-50  | <20 | 20-50 | 200-500                 | <20 | >500 | <20 | <20 |
| B    | 0 – 20            | 20-40  | -   | <20   | 200-500                 | <20 | >500 | <20 | <20 |
|      | 20 – 40           | 50-200 | -   | <20   | 200-500                 | <20 | >500 | <20 | <20 |

E=esmectite; V=vermiculite; EVne=minerais dos grupos da esmectite e vermiculite não especificado; I=illite; C=caulinite; Imve=interestratificados (de minerais micáceos e vermiculites ou esmectites); Q=quartzo; F=feldspato; - = não detetado.

Para além da caracterização dos solos, colheram-se, mensalmente, amostras de terra, nas duas profundidades (0-20 cm, 20-40 cm), para avaliação da variação dos teores de N<sub>inorgânico</sub> (N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> + N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>).

Para a determinação da mineralização potencial do N<sub>orgânico</sub> nos dois solos melhorados com a incorporação de palha de arroz foram colhidas amostras de terra “não perturbadas”, imediatamente após incorporação dos resíduos no solo (composição das palhas não foi determinada porque os resíduos já se encontravam no solo à data do início do estudo), e anteriormente à adubação de fundo e sementeira, usando cilindros de PVC (Ø 15 cm x 15 cm altura), em cada solo, num total de 18 cilindros/solo [2 solos (A e B) x 3 períodos de incubação (t<sub>0</sub>, t<sub>1</sub>, t<sub>2</sub>) x dois níveis de água no solo (capacidade de campo, alagamento) x 3 repetições].

### 3.3.2. Colheita de amostras de água

Para caracterização química da água de rega, colheram-se amostras de água na fonte (de origem subterrânea, para o solo A, e proveniente da Associação de Regantes e Beneficiários do Vale do Sorraia, para o solo B), em 19 de maio de 2010 (Quadro 10).

As duas águas apresentavam um pH ligeiramente alcalino, sem problemas de salinização, mas com problemas crescentes de toxicidade provocada pelos cloretos (Cl<sup>-</sup>), especialmente a água de rega da Associação de Regantes (> 70 mg Cl<sup>-</sup> l<sup>-1</sup>) (Ayers & Westcot, 1976). No entanto, Ayers & Westcot (1985) referem que a sua aplicação em sulcos não apresenta restrições no que respeita à toxicidade provocada pelos Cl<sup>-</sup> [Valor Máximo Recomendado (VMR) = 142 mg Cl<sup>-</sup> l<sup>-1</sup>]. De acordo com a legislação portuguesa (Decreto-Lei n.º 236/98), a água da Associação de Regantes apresenta-se no limite de admissibilidade para a rega por sulcos (VMR = 70 mg Cl<sup>-</sup> l<sup>-1</sup>). Ambas as águas apresentavam um teor residual de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, mas teores apreciáveis de azoto nítrico (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), principalmente na água de origem subterrânea. Em ambos os casos, os teores eram inferiores ao VMR (50 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup> l<sup>-1</sup>) definido pelo Decreto-Lei n.º 236/98, para águas destinadas à rega.

Quadro 10. Caracterização das águas de rega utilizadas nas duas parcelas (A e B)

| Características                                      | Água subterrânea   | Associação de Regantes |
|--|--------------------|------------------------|
|  | (poço)<br>(Solo A) | (Solo B)               |
| pH   | 7,7                | 7,9                    |
| Condutividade elétrica (CE, mS cm <sup>-1</sup> )    | 0,4                | 0,5                    |
| Ca <sup>2+</sup> (mg l <sup>-1</sup> )               | <18                | 30                     |
| Mg <sup>2+</sup> (mg l <sup>-1</sup> )               | 8,0                | 11,1                   |
| Na <sup>+</sup> (mg l <sup>-1</sup> )                | 42                 | 51                     |
| Cl <sup>-</sup> (mg l <sup>-1</sup> )                | 49,6               | 70,9                   |
| K <sup>+</sup> (mg l <sup>-1</sup> )                 | 3,6                | 7,4                    |
| N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg l <sup>-1</sup> ) | 0,4                | 0,2                    |
| N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg l <sup>-1</sup> ) | 9,5                | 4,9                    |

Durante o ciclo cultural do arroz, colheram-se, também, regularmente, amostras da lâmina de água à superfície de cada solo, para avaliação da variação do pH, dos teores de N<sub>inorgânico</sub> e dos cátions solúveis.

### 3.3.3. Medições SPAD e colheita de amostras de material vegetal

Durante o ciclo cultural do arroz, avaliou-se o seu estado nutricional através dum medidor de clorofila portátil (SPAD-502, Konica Minolta) nas plantas, em ambas as parcelas. Este método simples, expedito, e não destrutivo, para avaliação, indireta, do teor de clorofila e da concentração de N nas folhas, é uma importante medida para a determinação da eficiência do uso de N pela planta, permitindo planear a adubação de cobertura em função do estado nutricional da planta (Balasubramanian *et al.*, 1999; Dobermann & Fairhurst, 2000).

As leituras SPAD deverão ser convertidas, utilizando uma curva de calibração (leitura vs N<sub>total</sub> ou teor de clorofila, na planta). Esta curva está ainda a ser determinada, pelo que neste trabalho apenas se apresentarão os valores SPAD.

A colheita de plantas foi efetuada em outubro, após a maturação fisiológica do grão. Procedeu-se a uma colheita de plantas completas (parte aérea + raiz), em cada talhão (1 m<sup>2</sup>), nos dois solos, para avaliação da produtividade e análise química do N exportado em cada órgão da planta. As plantas foram separadas em raízes, caule+folhas e panícula, e colocadas a secar em estufa com ventilação forçada, durante um período de 48 h e temperatura aproximada de 65 °C. Determinou-se o peso seco (g) de cada fração e, posteriormente, as amostras foram moídas a 0,5 mm e analisadas quimicamente quanto ao teor de N total.

### **3.4. Métodos laboratoriais**

#### **3.4.1. Análise física, química e mineralógica das amostras de terra e água**

A preparação das amostras de terra efetuou-se no Instituto Nacional de Investigação Agrária (INIA), na Unidade de Investigação, Ambiente e Recursos Naturais (UIARN), em Oeiras. As determinações físicas e químicas nas amostras de terra e água foram efetuadas na UIARN, em Lisboa, e as do  $N_{\text{inorgânico}}$  foram realizadas na UIARN, em Oeiras. As determinações para identificação dos minerais argilosos foram efetuadas no Instituto Superior de Agronomia (Lisboa).

Todas as amostras de terra foram secas à temperatura ambiente e posteriormente crivadas, utilizando para o efeito um crivo de malha 2 mm, separando deste modo a fração grosseira (>2 mm) da fração fina (<2 mm) e permitindo uma maior homogeneidade das amostras para análise química. Todas as determinações laboratoriais foram realizadas na fração de terra fina.

##### **3.4.1.1. Análise textural do solo**

Para determinação da granulometria do solo utilizou-se o método densimétrico, proposto por Bouyoucos (1936). Este método baseia-se no princípio de que a matéria em suspensão (limo e argila) confere determinada densidade ao líquido. Através de um densímetro, Bouyoucos relacionou as densidades com o tempo de leitura e a temperatura, estimando a percentagem das partículas. A classificação textural do solo foi determinada através do diagrama triangular de Gomes & Silva (1962).

##### **3.4.1.2. Caracterização das argilas**

A avaliação da composição mineralógica da fração argilosa das amostras de terra foi efetuada por difração de raio X, em montagens orientadas sobre lâmina de vidro. A preparação dos minerais de argila foi efetuada de acordo com o método referido por Robert & Tessier (1974).

##### **3.4.1.3. $pH_{(H_2O)}$ do solo e água**

A determinação do  $pH_{(H_2O)}$  nas amostras de terra realizou-se numa suspensão de terra:água, na proporção 1:2,5 (m/v), após agitação constante e uma hora de repouso, utilizando um potenciómetro com elétrodo de vidro (LQARS, 1977), calibrado previamente com soluções de referência tamponizadas a pH 4,0 e 7,0, a 20 °C.

O pH das águas foi lido diretamente nas amostras de água, previamente filtradas com papel de filtro Whatman n.º 42.

#### **3.4.1.4. Condutividade elétrica (CE) na água**

A condutividade elétrica ( $\text{dS m}^{-1}$ ) foi determinada, de forma direta na amostra de água, através dum condutivímetro, calibrado com solução-padrão e com a devida correção para a temperatura ambiente.

#### **3.4.1.5. Azoto inorgânico ( $N_{\text{inorgânico}}$ ) no solo e água**

O azoto inorgânico ( $N_{\text{inorgânico}}$ ), ou mineral, determinado neste estudo, é a soma do  $\text{N-NH}_4^+$  com o  $\text{N-NO}_3^-$ .

Os teores de  $\text{N-NH}_4^+$  e  $\text{N-NO}_3^-$  ( $\text{mg N kg}^{-1}$ ) foram determinados em extratos de terra com  $\text{CaCl}_2$  (0,01 M), na proporção 1:10 (m/v), após uma agitação (orbital) de 1 h, e posterior filtração com papel de filtro Whatman n.º 42. As leituras foram efetuadas num analisador automático de fluxo segmentado “Skalar”.

A determinação do teor de  $\text{N-NH}_4^+$  foi baseada na reação de Berthelot, e o teor de  $\text{N-NO}_3^-$  foi determinado pelo reagente de Griess-Ilosvay após redução em coluna de cádmio (Houba *et al.*, 1995).

Nas amostras de água, o teor de  $N_{\text{inorgânico}}$  ( $\text{N-NO}_3^-$  e  $\text{N-NH}_4^+$ ) foi lido diretamente na amostra filtrada, recorrendo ao autoanalisador “Skalar”.

#### **3.4.1.6. Azoto total ( $N_{\text{total}}$ ) no solo**

O azoto total ( $\text{g N}_{\text{total}} \text{kg}^{-1}$ ) nas amostras de terra e nos cilindros de incubação, isto é, a soma da fração orgânica e amoniacal (incluindo o “fixado” nos minerais argilosos 2:1) foi determinado por combustão seca (ISO 13878, 1998), a uma temperatura superior a  $1350\text{ }^\circ\text{C}$ , na presença de  $\text{O}_2$ , num analisador elementar automático (LECO CNS). Os compostos de azoto mineral e orgânico foram oxidados e volatilizados. Os produtos da combustão são óxidos de azoto ( $\text{NO}_x$ ) e  $\text{N}_2$ . Depois de transformar todas as formas de N em  $\text{N}_2$ , o teor de  $N_{\text{total}}$  foi medido utilizando a condutividade térmica.

#### **3.4.1.7. Carbono total ( $C_{\text{total}}$ ), carbono orgânico ( $C_{\text{orgânico}}$ ) e matéria orgânica no solo**

Para a determinação do C total ( $\text{g C}_{\text{total}} \text{kg}^{-1}$ ) no solo, utilizou-se o método de combustão seca, onde o C existente na amostra foi oxidado, passando a dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), por aquecimento da amostra de terra a uma temperatura de  $1350\text{ }^\circ\text{C}$  (ISO 10694, 1995), num analisador elementar automático (LECO CNS). A quantidade de  $\text{CO}_2$  libertada foi então medida, utilizando um método de deteção por infravermelhos. A metodologia usada para cálculo do teor de C orgânico ( $\text{g C}_{\text{org}} \text{kg}^{-1}$ ) no solo, baseia-se no método de combustão seca. O carbono orgânico foi calculado através da diferença entre a quantidade de  $C_{\text{total}}$  e o teor de carbonatos totais, calculados através de método volumétrico. Como os solos eram de reação ligeiramente ácida, a presença de carbonatos era insignificante. Deste modo, considera-se o teor de  $C_{\text{org}}$  igual ao  $C_{\text{total}}$ . Daqui para a frente referiremos apenas a designação  $C_{\text{total}}$ .

#### **3.4.1.8. Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> e Na<sup>+</sup> no solo (bases de troca) e na água**

Os catiões Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> e Na<sup>+</sup> adsorvidos no complexo de troca do solo, designados por bases de troca, foram extraídos com uma solução de acetato de amónio (CH<sub>3</sub>COONH<sub>4</sub>) 1M, a pH 7,0 (Dewis & Freitas, 1970) e expressos em cmol<sub>(+)</sub> kg<sup>-1</sup>. O Ca<sup>2+</sup> e o Mg<sup>2+</sup> foram doseados por espectrofotometria de absorção atómica com chama e o K<sup>+</sup> e Na<sup>+</sup> foram medidos por fotometria de chama.

Nas amostras de água, os teores de Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> foram lidos diretamente nas amostras filtradas, por espectrofotometria de massa, com plasma acoplado indutivamente (ICP). Os teores de Na<sup>+</sup> e K<sup>+</sup> foram medidos, diretamente nas amostras filtradas, por fotometria de chama.

#### **3.4.1.9. Cloretos (Cl<sup>-</sup>) na água**

Os teores de Cl<sup>-</sup> presentes nas amostras de água foram determinados pelo método de Mohr (ISO 9297, 1989). Os iões cloreto foram titulados com solução padronizada de nitrato de prata (AgNO<sub>3</sub>) 0,1M, utilizando como indicador o dicromato de potássio (K<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub>).

#### **3.4.1.10. Capacidade de troca catiónica (CTC)**

As capacidades de troca catiónica (cmol<sub>(+)</sub> kg<sup>-1</sup>) dos dois solos foram determinadas pela soma das bases de troca. A acidez de troca foi obtida por titulação do extrato preparado para a determinação das bases de troca, com hidróxido de sódio (NaOH) 0,1M (Dewis & Freitas, 1970).

#### **3.4.1.11. Mineralização potencial do N<sub>orgânico</sub> do solo melhorado com resíduos vegetais**

Doze cilindros de cada parcela foram incubados no laboratório do INIA (UIARN), em Oeiras, durante dois períodos ( $t_i = 5, 30$  dias), à temperatura de 25±1 °C (que pretende simular a temperatura média no solo ao afilhamento), em condições de arejamento do solo e outros doze cilindros das mesmas duas parcelas foram incubados nos mesmos períodos, em condições de alagamento. Recorreu-se a água destinada à rega em cada um dos solos para a manutenção dos níveis de água nos cilindros. Os outros três cilindros de cada solo não foram incubados, para determinação do N<sub>inorgânico</sub> e N<sub>total</sub> no período  $t_0$ .

Na incubação aeróbia, o solo foi mantido à capacidade de campo; na incubação anaeróbia, o solo foi mantido encharcado, com uma lâmina de água de cerca de 1-2 cm de altura (para o efeito, a base dos cilindros foi tapada com um saco plástico e de dois em dois dias, foi-se repondo a lâmina de água em cada cilindro). No final de cada incubação, as amostras de terra foram secas ao ar e divididas em duas camadas: 0-7,5 e 7,5-15 cm. Cada camada foi crivada (<2 mm) e analisada quanto aos teores de N<sub>total</sub> e N<sub>inorgânico</sub>.

A mineralização bruta potencial ( $\Delta N_{min.}$ ) (mg kg<sup>-1</sup>) foi determinada através da diferença entre N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (mg kg<sup>-1</sup>) nas amostras incubadas ( $t_i$ ) e nas amostras não incubadas ( $t_0$ ). A nitrificação

potencial ( $\Delta N_{nit.}$ ) ( $mg\ kg^{-1}$ ) foi determinada pela diferença entre o teor de  $N-NO_3^-$  nas amostras incubadas ( $t_i$ ) e nas amostras não incubadas ( $t_0$ ).

Os métodos analíticos utilizados foram os mesmos que os referidos em 3.4.1.5 e 3.4.1.6.

### **3.4.2. Análise física e química do material vegetal**

#### **3.4.2.1. Leituras SPAD**

Para o efeito, efetuaram-se 10 medições SPAD por cada talhão, com uma periodicidade de 2 - 3 semanas, na folha "Y" (folha mais jovem desenvolvida) de cada planta, e em cada solo. As leituras foram efetuadas a meio do limbo da folha, num dos lados da nervura central.

#### **3.4.2.2. Produtividade**

A produção de matéria seca nos vários órgãos da planta (raízes, caules+folhas e panículas) foi determinada por pesagem do material seco, estimando-se a produtividade ( $kg\ ha^{-1}$ ).

Estimou-se o Índice à Colheita (IC, %) (Carranca, 2010):  $[\text{peso do grão } (kg\ ha^{-1})/\text{peso biomassa aérea } (kg\ ha^{-1})] \times 100$ .

#### **3.4.2.3. Concentração e exportação de N**

A concentração de  $N_{total}$  no material vegetal ( $g\ N\ kg^{-1}\ MS$ ) foi determinada através do método de combustão seca, semelhante ao utilizado para as amostras de terra. O teor exportado de N ( $kg\ N\ ha^{-1}$ ) num determinado órgão da planta foi calculado através do produto da concentração do elemento ( $g\ N\ kg^{-1}$ ) pelo valor da MS produzida pelo órgão da planta, num hectare ( $kg\ MS\ ha^{-1}$ ).

Estimou-se a EUN através da recuperação do N pela planta (%RE) (Carranca, 2010):  $[\text{teor de N na planta completa } (kg\ N\ ha^{-1})/\text{fertilizante aplicado } (kg\ N\ ha^{-1})] \times 100$ .

### **3.5. Análise estatística dos resultados**

Os dados foram analisados estatisticamente recorrendo-se à análise de variância (ANOVA) usando o Modelo Linear Generalizado (MLG), o *Main-effects ANOVA* para a maioria das características químicas da lâmina de água à superfície dos solos A e B, considerando as parcelas de solo e a data como fatores, e *One-Way ANOVA* para o  $N_{total}$  exportado na planta completa ( $kg\ N\ ha^{-1}$ ), em ambos os solos. Os resultados foram apresentados como médias e desvios-padrão, com separação de médias usando o teste de Bonferroni sempre que o valor de  $F$  foi significativo ( $p < 0,05$ ).

Nos casos do  $N_{inorgânico}$ ,  $N-NH_4^+$  e  $N-NO_3^-$  na dinâmica no solo, e do  $N_{total}$ ,  $N-NH_4^+$  e  $N-NO_3^-$  nas incubações (aeróbia e anaeróbia) efetuou-se a avaliação da distribuição dos dados, segundo a curva de Gauss. Verificou-se que essa distribuição seguia a normalização, pelo que se analisaram e compararam as médias dos valores originais, segundo o teste de Bonferroni ( $p < 0,05$ ).

Para a aplicação do modelo matemático de exponencial simples (Stanford & Smith, 1972) com uma única fonte azotada [N potencialmente mineralizável ( $N_{min}) = N_0(1 - e^{-kt})$ ] aos dados das incubações aeróbias e anaeróbias e conjunto de ambas, utilizou-se o algoritmo

“Levenberg-Marquardt”, onde  $N_{\min}$  é o cumulativo de N mineralizado no tempo  $t$ ,  $N_0$  é o N potencialmente mineralizável no tempo  $t_0$ , e  $k$  é a taxa constante de mineralização ( $d^{-1}$ ). Esta equação tem duas incógnitas ( $N_0$  e  $k$ ).

Utilizou-se o programa *Statistica* (6.0) para análise dos resultados.

Para obtenção da curva de regressão das leituras SPAD, utilizou-se o programa *Microsoft Office Excel* 2003, tendo sido ajustada uma regressão linear aos dados obtidos nas plantas cultivadas em ambos os solos.

## 4. Resultados e Discussão

### 4.1. Solo

#### 4.1.1. Dinâmica do $N_{\text{inorgânico}}$ nos solos ( $N\text{-NH}_4^+ + N\text{-NO}_3^-$ ), durante o ciclo do arroz

Para uma utilização eficiente do N, uma boa gestão do nutriente é de primordial importância. A dose de N, o período e modo de aplicação, bem como o tipo de fertilizante utilizado são importantes fatores que afetam a EUN (Dobermann & Fairhurst, 2000). À exceção das leguminosas que desenvolvem simbiose para a fixação de azoto atmosférico ( $N_2$ ), a maioria das plantas absorvem o  $N_{\text{inorgânico}}$  presente na solução do solo na forma nítrica ( $\text{NO}_3^-$ ) ou amoniacal ( $\text{NH}_4^+$ ) (Mengel & Kirkby, 2001). A forma preferencialmente absorvida é determinada pela sua abundância no solo (Fageria *et al.*, 2003), mas também pelo dispêndio energético que a sua absorção acarreta. Em idênticas quantidades, dum modo geral, a forma nítrica é preferencialmente absorvida pela planta, dado a sua mobilidade no solo.

Acompanhou-se a evolução dos teores residuais de  $N\text{-NH}_4^+ + N\text{-NO}_3^-$  ( $N_{\text{inorgânico}}$ ) no solo, ao longo do ciclo cultural do arroz.

O  $N_{\text{inorgânico}}$  determinado ao longo do ciclo cultural do arroz (Quadro 11) diferiu significativamente ( $p < 0,001$ ) entre os dois solos e nas duas profundidades, verificando-se a maior concentração ( $9,3 \text{ mg kg}^{-1}$ ) no solo B e na profundidade 0 – 20 cm ( $9,2 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Este solo apresentou também maior teor de  $N\text{-NH}_4^+$  ( $8,2 \text{ mg kg}^{-1}$ ). O  $N\text{-NH}_4^+$  encontrava-se acumulado na camada superficial ( $5,8 \text{ mg kg}^{-1}$ ). No solo A, o  $N\text{-NO}_3^-$  foi a forma azotada predominante ( $3,7 \text{ mg kg}^{-1}$ ).

Quadro 11. Dinâmica do  $N_{\text{inorgânico}}$  nos solos A e B, ao longo do ciclo cultural do arroz (2010)

| Fonte de variação          | $N\text{-NH}_4^+$      | $N\text{-NO}_3^-$ | $N_{\text{inorgânico}}$<br>( $N\text{-NH}_4^+ + N\text{-NO}_3^-$ ) |
|----------------------------|------------------------|-------------------|--|
|                            | (mg kg <sup>-1</sup> ) |                   |  |
| Solo                       |                        |                   |  |
| A                          | 1,7 b B                | 3,7 a A           | 5,4 b  |
| B                          | 8,2 a A                | 1,1 b B           | 9,3 a  |
| Profundidade               |                        |                   |  |
| 0 – 20 cm                  | 5,8 a A                | 3,3 a B           | 9,2 a  |
| 20 – 40 cm                 | 4,1 b A                | 1,4 b B           | 5,6 b  |
| Data                       |                        |                   |  |
| 19 maio                    | 4,6 ab                 | 7,3 a             | 11,8 a   |
| 24 maio                    | 5,8 ab                 | 2,5 bc            | 8,3 ab   |
| 16 junho                   | 4,9 ab                 | 3,6 b             | 8,5 ab   |
| 30 junho                   | 6,9 a                  | 2,5 bc            | 9,4 ab   |
| 14 julho                   | 4,7 ab                 | 0,8 c             | 5,6 bc   |
| 17 agosto                  | 4,8 ab                 | 0,9 c             | 5,8 bc   |
| 15 setembro                | 6,6 ab                 | 0,4 c             | 6,9 abc  |
| 21 outubro                 | 1,5 b                  | 1,0 c             | 2,6 c  |
| ANOVA                      |                        |                   |  |
| Solo                       | 70,5***                | 56,5***           | 24,1***  |
| Profundidade               | 4,7*                   | 28,5***           | 20,8***  |
| Data                       | 2,2*                   | 20,1***           | 6,4***   |
| Solo x Profundidade        | ns                     | ns                | ns   |
| Solo x Data                | 2,3*                   | 6,7***            | 3,7**  |
| Profundidade x Data        | 2,6*                   | 4,0**             | 5,4***   |
| Solo x Profundidade x Data | 3,9**                  | ns                | 3,8**  |

ns, \*, \*\*, \*\*\*=valores de  $F$  não significativos ( $p \geq 0,05$ ) e significativos a  $p < 0,05$ ,  $0,01$  e  $0,001$ , respetivamente; médias com letras minúsculas diferentes, na mesma coluna, e para a mesma variável diferem significativamente para  $p < 0,05$  (teste de Bonferroni); letras maiúsculas diferentes na mesma linha diferem significativamente para  $p < 0,05$  (teste de Bonferroni).

O solo B apresentou teores mais elevados de  $N_{\text{inorgânico}}$  em consequência dos valores mais elevados de  $\text{NH}_4^+$  (Quadro 11), a forma inorgânica mais estável em condições de alagamento (De Datta, 1981; Mikkelsen *et al.*, 1995; Carranca, 1996, 2000; Fageria *et al.*, 2003). Neste solo, os valores de  $N_{\text{inorgânico}}$  mantiveram-se elevados até final do período de alagamento (15 setembro), verificando-se posteriormente uma aparente diminuição. Associada à absorção pelas plantas, os teores de  $N_{\text{inorgânico}}$  aparentemente menores após a adubação de cobertura podem ser também justificados pela ocorrência de perdas de vários tipos.

No solo A, o teor de  $N_{\text{inorgânico}}$  após a adubação de fundo e alagamento (19 de maio) sofreu uma significativa diminuição (Fig. 11), mantendo-se relativamente estável até final do ciclo cultural. Além da absorção de N pelas plantas, as perdas de N também terão contribuído para esta redução da concentração.

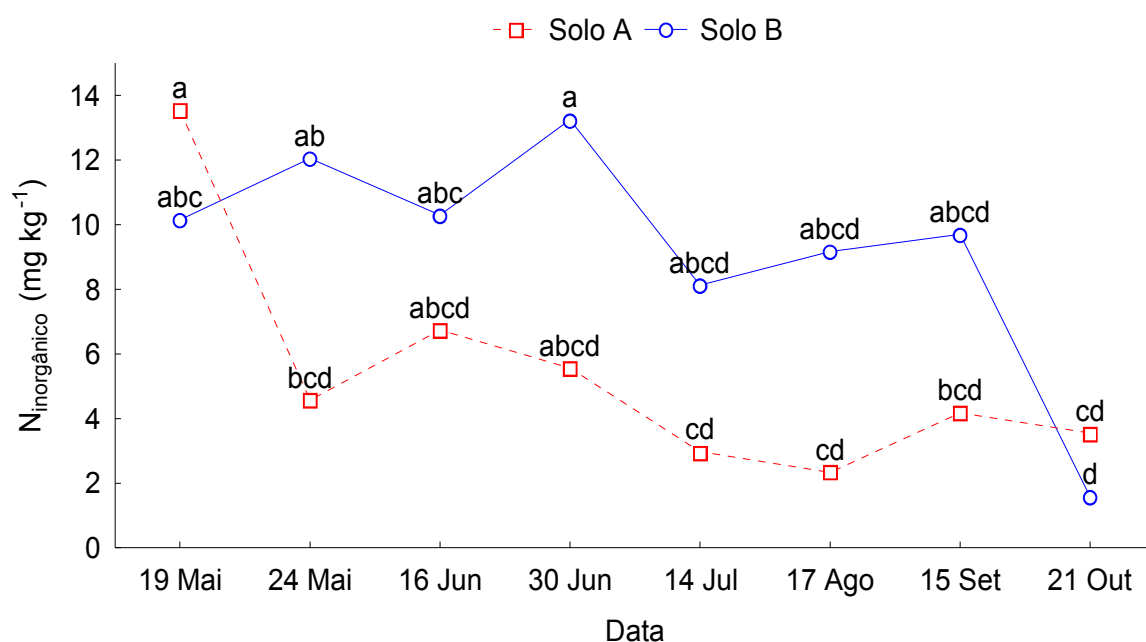


Fig. 11. Efeito da interação solo x data de amostragem sobre o teor de  $N_{\text{inorgânico}}$ , ao longo do ciclo cultural do arroz (2010). (Médias com letras diferentes diferem significativamente para  $p < 0,05$ , de acordo com teste de Bonferroni).

#### 4.1.1.1. Dinâmica do azoto amoniacal N ( $\text{N-NH}_4^+$ ) nos solos cultivados com arroz

O ião amónio é a principal forma inorgânica de N para as plantas de arroz cultivadas em solos alagados (De Varennes, 2003; Tabuchi *et al.*, 2007), devido à sua predominância em condições de anaerobiose, mas também porque a planta o usa com relativa eficiência. A substituição dos fertilizantes nítricos por fertilizantes amoniacais na nutrição do arroz visa a redução das perdas de N por lixiviação e desnitrificação.

A dinâmica do  $\text{NH}_4^+$  ao longo do ciclo cultural do arroz, nos dois solos, e em ambas as profundidades, diferiu significativamente, com concentrações mais elevadas no solo B e camada superficial (Quadro 11). No solo A, os teores de  $\text{N-NH}_4^+$  foram semelhantes e relativamente estáveis ao longo do ciclo cultural, em ambas as profundidades (Fig. 12). Para o facto de os teores serem

baixos ao longo do ciclo cultural do arroz, no solo A, contribui uma possível “fixação” do ião nos minerais de argila expansivos (2:1) após o alagamento, uma vez que, em comparação com o solo B, existem mais minerais deste tipo, principalmente vermiculite (Quadro 9). Esta perda temporária da forma amoniacal no solo é importante em termos de conservação do N no solo, evitando a sua rápida nitrificação, com perdas por lixiviação ou gasosas, podendo ficar disponível para as plantas quando se verifica uma redução da forma amoniacal disponível na solução do solo (Schneiders & Scherer, 1998; De Varennes, 2003).

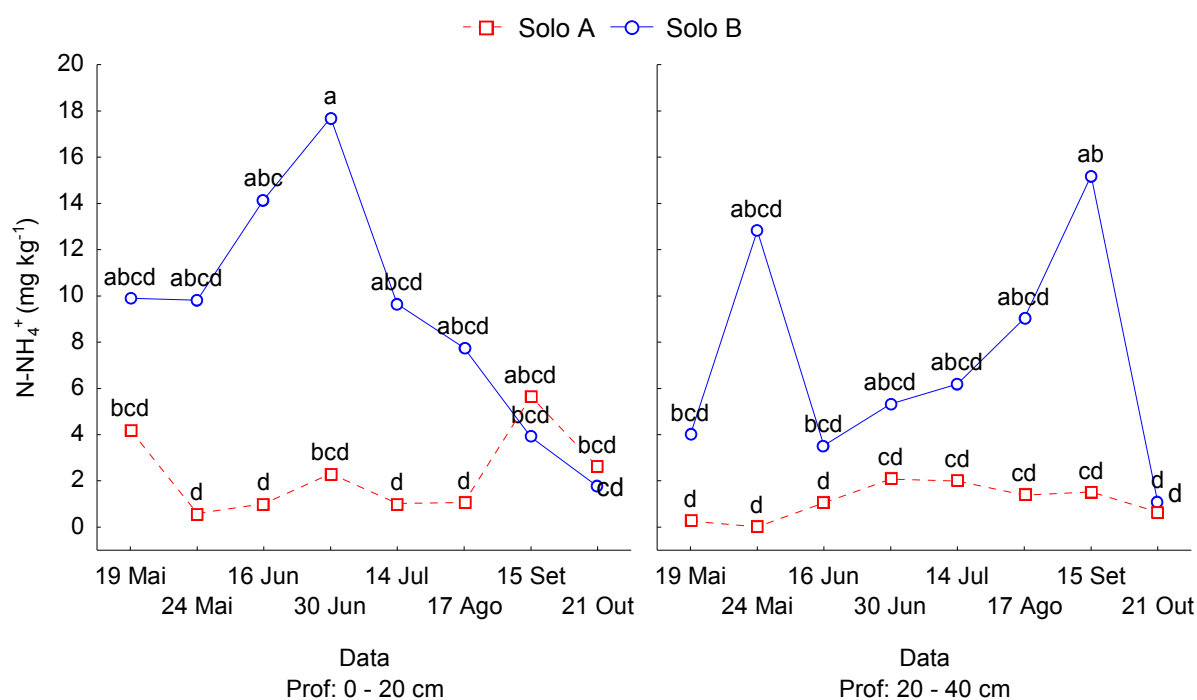


Fig. 12. Efeito da interação solo x profundidade x data de amostragem nos teores de  $N-NH_4^+$  em ambos os solos (A e B) (2010). (Médias com letras diferentes diferem significativamente para  $p < 0,05$ , de acordo com o teste de Bonferroni).

No solo B, na camada 0 – 20 cm, após a sementeira e alagamento (anaerobiose) os teores de  $N-NH_4^+$  aumentaram, atingindo um aparente máximo após uma breve interrupção do alagamento (30 de junho), devido, particularmente, à adubação de fundo. Posteriormente, e mesmo após a adubação de cobertura, o  $N-NH_4^+$  diminuiu significativamente para o final do ciclo cultural do arroz (Fig. 12). Esta diminuição poder-se-á justificar com a absorção pelas plantas que apresentam, predominantemente, o seu sistema radicular nesta camada superficial de solo. Como é referido por diversos autores (Yoshida & Hasegawa, 1982; Maclean, *et al.*, 2002; Gowda *et al.*, 2011), as raízes do arroz cultivado por alagamento encontram-se mais desenvolvidas à superfície, apresentando a planta um maior potencial de absorção do N nessa camada. Durante este período de decréscimo de N no solo, as necessidades azotadas da planta de arroz também aumentam, à semelhança do aumento de biomassa produzida (Mickelsen *et al.*, 1995). Uma outra hipótese para a diminuição do teor de  $N-NH_4^+$ , será a nitrificação e posterior desnitrificação ao difundir-se para a camada anaeróbia, sendo perdido para fora do sistema solo-planta (De Datta, 1981, 1995). A redução da forma amoniacal disponível pode também ser resultado duma mineralização mais lenta da MO do solo, em

condições de anaerobiose, criadas pelo alagamento (De Varennes, 2003), ou por uma imobilização do N.

Na profundidade de 20 – 40 cm do solo B, após a incorporação dos resíduos da cultura anterior (palha de arroz) e do adubo mineral (24 de maio), o teor de  $\text{N-NH}_4^+$  determinado foi idêntico ao observado na camada superficial (Fig. 12) e ligeiramente superior ao inicial da camada 20 - 40 cm. A concentração desta forma mineral de N parece diminuir após o alagamento, aumentando depois ligeiramente, até à última data de amostragem com o solo alagado (15 de setembro). Para este aumento poderá ter contribuído uma movimentação do  $\text{N-NH}_4^+$  da camada superior, o que justifica também a diminuição observada à superfície. Embora o ião amónio seja mais estável no solo, podendo ser adsorvido no complexo de troca, também está sujeito a lixiviação, principalmente num solo arenoso (De Datta, 1991; Carranca, 1996, 2000; Choudhury & Kennedy, 2005). Devido às condições de aerobiose observadas no final do ciclo cultural que aumentam a nitrificação (De Varennes, 2003), verificou-se uma diminuição significativa do  $\text{N-NH}_4^+$  no solo, nesta data.

#### **4.1.1.2. Dinâmica do azoto nítrico ( $\text{N-NO}_3^-$ ) nos solos cultivados com arroz**

Os teores de  $\text{N-NO}_3^-$  variaram significativamente em ambos os solos, com o teor mais elevado no solo A e na camada superior (Quadro 11). O solo A apresentou o valor mais elevado na primeira amostragem, decrescendo na segunda data e mantendo-se relativamente estável até final do ciclo cultural (Fig. 13). O teor inicial no solo B era significativamente inferior ao do solo A e manteve-se sensivelmente constante até ao final do ciclo vegetativo. Com a incorporação dos resíduos da cultura anterior (palha de arroz), com uma relação  $\text{C/N} > 25$ , na primeira data, a imobilização do N pelos microrganismos é potenciada (Carranca, 1996, 2000), podendo explicar o decréscimo do  $\text{N-NO}_3^-$  no solo. Não se determinou o  $\text{N}_{\text{orgânico}}$  no solo ao longo do ciclo cultural, em especial, o  $\text{N}_{\text{orgânico}}$  solúvel, de modo a confirmar esta eventual imobilização do N. As perdas por desnitrificação podem, também, ter sido importantes, uma vez que o aumento do teor de C no solo, após a incorporação dos resíduos, é um fator que influencia este processo (Carranca, 1996; Ladha *et al.*, 2005). A percolação, ou movimentação no solo em profundidade, poderá ser outra explicação para a diminuição dos teores de nitrato, favorecida pela textura ligeira do solo (De Datta, 1981; Carranca, 1996, 2000; De Varennes, 2003). Por seu lado, a lixiviação do  $\text{N-NO}_3^-$  para camadas mais profundas (menor teor de  $\text{O}_2$ ) é um dos fatores que pode contribuir para o aumento da taxa de desnitrificação (Ladha *et al.*, 2005). Também a absorção pela planta poderá ter contribuído para a diminuição de  $\text{N-NO}_3^-$  verificada nas duas parcelas.

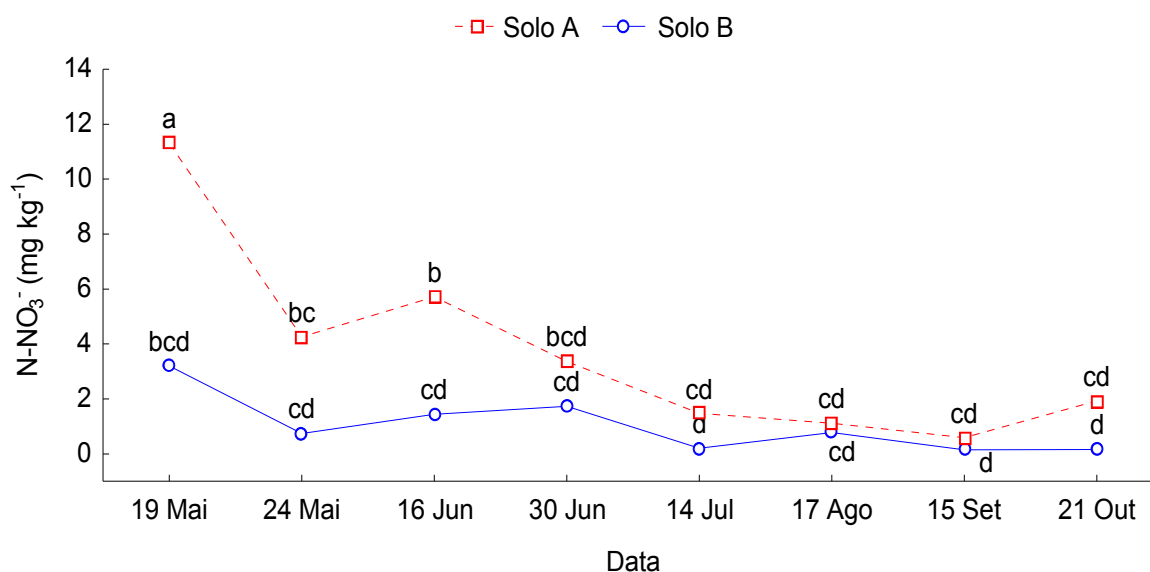


Fig. 13. Efeito da interação solo x data de amostragem sobre o teor do N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, nos dois solos (A e B) de Salvaterra de Magos. (Médias com letras diferentes diferem significativamente para  $p < 0,05$ , de acordo com teste de Bonferroni).

No que se refere à interação da profundidade com as datas de colheita (Fig. 14), os valores de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> mais elevados foram medidos à superfície (0 – 20 cm) e apenas na primeira data e em 16 de junho, mantendo-se residuais nas restantes datas até ao final do ciclo cultural do arroz. Comparativamente com os teores de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> no solo, estes valores reforçam o facto da presença do ião nitrato no solo ser insignificante na produção de arroz com recurso a alagamento, encontrando-se presente em quantidades mínimas nos solos (De Datta, 1981; Dobermann & Fairhurst, 2000).

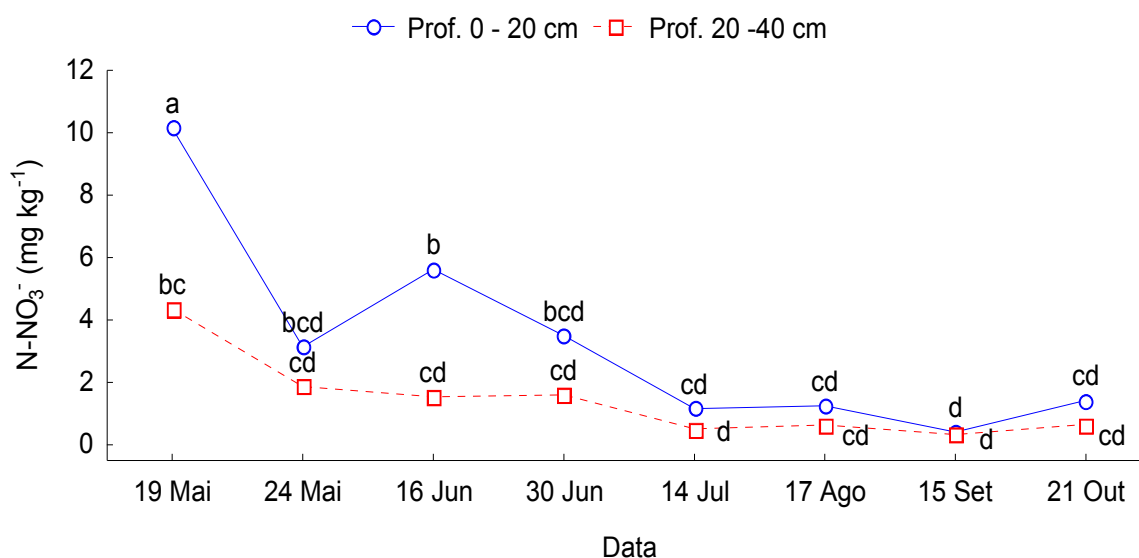


Fig. 14. Efeito da interação profundidade x data de amostragem nos teores de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> em ambos os solos (A e B) (2010). (Médias com letras diferentes diferem significativamente para  $p < 0,05$ , de acordo com o teste de Bonferroni).

#### **4.1.1.3. Mineralização potencial do N nos solos**

A mineralização do N, processo de conversão biológica das formas orgânicas de N em minerais, é realizada por organismos heterotróficos (bactérias e fungos) que obtêm energia das substâncias orgânicas (Carranca, 1996; 2000; De Varennes, 2003; Coleman *et al.*, 2004).

A mineralização do N orgânico no solo tanto pode ocorrer em condições aeróbias, como anaeróbias. Contudo, a mineralização em anaerobiose é mais lenta, e, conseqüentemente, a produção de  $\text{N-NH}_4^+$  é mais baixa (White & Reddy, 2001). A avaliação deste processo é fundamental para se estimar a disponibilidade do N no solo (Sahrawat, 2010).

Avaliou-se a mineralização/nitrificação/imobilização potencial do  $\text{N}_{\text{orgânico}}$  nos solos, imediatamente após a incorporação dos resíduos de palha de arroz, quer em condições aeróbias, quer anaeróbias.

##### **4.1.1.3.1. Incubação aeróbia**

No Quadro 12 apresentam-se os valores médios do  $\text{N}_{\text{inorgânico}}$  obtidos após as incubações aeróbias dos solos A e B, melhorados com a incorporação de palha de arroz imediatamente antes da sementeira e alagamento do solo. No solo B ocorreu uma ligeira nitrificação, em ambas as datas (5d e 30d), tendo-se também verificado um aparente decréscimo (não significativo) da concentração do  $\text{N}_{\text{total}}$ , muito em especial na camada 7,5-15 cm. A mineralização neste solo foi apreciável aos 30 dias ( $5,33 \text{ mg N-NH}_4^+ \text{ kg}^{-1}$ ), na camada 7,5-15 cm. Nos restantes dias e camada, verificou-se uma perda do  $\text{N-NH}_4^+$  no solo. Esta perda pode ter sido na forma gasosa por volatilização, desnitrificação ou nitrificação incompleta, ou, ainda, por “fixação” nos minerais argilosos do tipo 2:1.

No solo A ocorreu também mineralização apreciável nos primeiros 5 dias de incubação (tendência para um decréscimo do  $\text{N}_{\text{total}}$  no solo). Mas uma vez que o  $\text{N}_{\text{total}}$  apresentou um ligeiro aumento [apenas significativo com teste de Fisher,  $p < 0,05$  (dados não apresentados)] no período entre os 5 e 30 dias em ambas as camadas, os valores negativos de N mineralizado podem significar uma certa imobilização do N no solo.

Quadro 12. Resultados médios (desvio-padrão) obtidos nas incubações aeróbias dos solos A e B

| Dias (d)                 | N <sub>total</sub><br>(g kg <sup>-1</sup> ) |                          | N <sub>inorgânico</sub> (mg kg <sup>-1</sup> ) |                   |                                     |                   | ΔN <sub>min.</sub><br>(mg kg <sup>-1</sup> ) |              | ΔN <sub>nit.</sub><br>(mg kg <sup>-1</sup> ) |        |
|--------------------------|---|--------------------------|--|-------------------|-------------------------------------|-------------------|--|--------------|--|--------|
|                          | 1   | 2                        | N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>                 |                   | N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>      |                   | 1  | 2            | 1  | 2      |
| <b>Solo A</b>            |   |                          |  |                   |                                     |                   |  |              |  |        |
| 0 d                      | 0,59 a<br>(0,07)                            | 0,59 a<br>(0,07)         | 4,21 bc<br>(3,76)                              | 4,21 bc<br>(3,76) | 14,05 a<br>(2,64)                   | 14,05 a<br>(2,64) | -  | -            | -  | -      |
| 5 d                      | 0,44 a<br>(0,07)                            | 0,46 a<br>(0,03)         | 1,93 c<br>(0,20)                               | 2,05 c<br>(0,98)  | 5,55 b<br>(1,18)                    | 2,60 b<br>(1,19)  | -2,28  | -2,16        | -8,50  | -11,45 |
| 30 d                     | 0,45 a<br>(0,03)                            | 0,53 a<br>(0,03)         | nd<br>-  | nd<br>-           | 6,98 ab<br>(2,35)                   | 5,48 b<br>(2,78)  | -4,21  | -4,21        | -7,07  | -8,57  |
| <b>Solo B</b>            |   |                          |  |                   |                                     |                   |  |              |  |        |
| 0 d                      | 0,61 a<br>(0,14)                            | 0,61 a<br>(0,14)         | 9,90 ab<br>(3,65)                              | 9,90 ab<br>(3,65) | 6,25 b<br>(4,25)                    | 6,25 b<br>(4,25)  | -  | -            | -  | -      |
| 5 d                      | 0,57 a<br>(0,17)                            | 0,49 a<br>(0,13)         | 0,55 c<br>(0,45)                               | 1,48 c<br>(0,00)  | 7,54 ab<br>(0,64)                   | 5,03 b<br>(1,28)  | -9,35  | -8,42        | <b>+1,29</b>                                 | -1,22  |
| 30 d                     | 0,50 a<br>(0,11)                            | 0,39 a<br>(0,09)         | nd<br>-  | 15,23 a<br>(0,00) | 8,09 ab<br>(1,68)                   | 3,58 b<br>(0,71)  | -9,90  | <b>+5,33</b> | <b>+1,84</b>                                 | -2,67  |
| <b>Fonte de variação</b> |   | <b>N<sub>total</sub></b> | <b>N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup></b>            |                   | <b>N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b> |                   |  |              |  |        |
| Solo (S)                 |   | ns                       | 33,5***  |                   | 6,0*                                |                   |  |              |  |        |
| Data (D)                 |   | 5,74**                   | 20,0***  |                   | 14,2***                             |                   |  |              |  |        |
| Prof. (P)                |   | ns                       | 14,2***  |                   | 5,5*                                |                   |  |              |  |        |
| S x D                    |   | ns                       | 13,0***  |                   | 13,6***                             |                   |  |              |  |        |
| S x P                    |   | ns                       | 13,7***  |                   | ns                                  |                   |  |              |  |        |
| P x D                    |   | ns                       | 11,6***  |                   | ns                                  |                   |  |              |  |        |
| S x D x P                |   | ns                       | 11,8***  |                   | ns                                  |                   |  |              |  |        |

ΔN<sub>min.</sub> = N mineralizável [(N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)<sub>ti</sub> - (N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)<sub>t0</sub>]; ΔN<sub>nit.</sub> = N nitrificado [(N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)<sub>ti</sub> - (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)<sub>t0</sub>]; Prof. 1, 2 = profundidade: 1=0-7,5 cm, 2=7,5-15 cm; t<sub>0</sub>=0d; t<sub>i</sub>=5d; 30d; d = dias; nd = não detetado; - = não medido; ns, \*\* = valor de F não significativo (p ≥ 0,05) e significativo a p < 0,01, respetivamente. (Médias com letras diferentes, na mesma coluna, e para a mesma variável diferem significativamente para p < 0,05, de acordo com o teste de Bonferroni).

Quando os resíduos incorporados no solo apresentam uma razão C/N > 25, como é o caso da palha de arroz, os microrganismos do solo assimilam o N<sub>inorgânico</sub> presente no solo e adicionado pela água de rega, como nos casos presentes (Carranca, 1996, 2000; De Varennes, 2003), ou seja, ocorre uma imobilização do N aos 5d. Este N é assim convertido na forma orgânica, que será facilmente re-mineralizado.

As eventuais perdas gasosas de N, em particular no solo B, deverão ser posteriormente determinadas, fechando os tubos incubados para recolha dos gases produzidos (NH<sub>3</sub> e NO<sub>x</sub>). Também a eventual “fixação” do NH<sub>4</sub><sup>+</sup> nos espaços interlamelares dos minerais argilosos expansivos (ilite, vermiculite, esmectite) terá de ser avaliada.

#### 4.1.1.3.2. Incubação anaeróbia

Ao longo da incubação anaeróbia do solo A verificou-se uma aparente diminuição do teor de N<sub>total</sub> (não significativo) em ambas as profundidades (Quadro 13), com concentrações ligeiramente superiores aos valores determinados na incubação aeróbia. Na camada superficial deste solo, a mineralização e nitrificação foram muito rápidas. Mas dum modo geral, o N potencialmente

mineralizável nas duas camadas e ambos os períodos de incubação terá sido perdido para fora do sistema, por desnitrificação ou volatilização, ou “fixado” na fração argilosa.

No solo B, o teor de  $N_{total}$  decresceu ligeiramente [apenas significativo no teste de Fisher,  $p < 0,05$  (dados não apresentados)] também significativamente durante os dois períodos de incubação, e em ambas as profundidades, para valores menores que os determinados na incubação aeróbia.

Aos 5 dias de incubação ocorreu nitrificação em ambas as camadas de terra (5,26 e 1,89 mg  $N-NO_3^- kg^{-1}$ ), superior à determinada na incubação aeróbia (Quadro 13).

A nitrificação em condições de anaerobiose ocorreu mais rapidamente (Quadro 13) do que em condições de aerobiose (Quadro 12). Esta maior velocidade de nitrificação poder-se-á explicar pelas condições alternadas de aerobiose/anaerobiose que possam ter ocorrido aquando da reposição de água nos cilindros (de dois em dois dias), porque a velocidade de decomposição do  $N_{orgânico}$  na ausência de  $O_2$  deverá ser menor do que em presença deste gás.

Quadro 13. Resultados médios (desvios-padrão) obtidos nas incubações anaeróbias dos solos A e B

| Dias (d)                 | $N_{total}$                   |                  | $N_{inorgânico} (mg kg^{-1})$ |                   |                              |                   | $\Delta N_{min.}$ |              | $\Delta N_{nit.}$ |              |
|--------------------------|-------------------------------|------------------|-------------------------------|-------------------|------------------------------|-------------------|-------------------|--------------|-------------------|--------------|
|                          | $(g kg^{-1})$                 |                  | $N-NH_4^+$                    |                   | $N-NO_3^-$                   |                   | $(mg kg^{-1})$    |              | $(mg kg^{-1})$    |              |
|                          | 1                             | 2                | 1                             | 2                 | 1                            | 2                 | 1                 | 2            | 1                 | 2            |
| <b>Solo A</b>            |                               |                  |                               |                   |                              |                   |                   |              |                   |              |
| 0 d                      | 0,59 a<br>(0,07)              | 0,59 a<br>(0,07) | 4,21 ab<br>(3,76)             | 4,21 ab<br>(3,76) | 14,05 a<br>(2,64)            | 14,05 a<br>(2,64) | -                 | -            | -                 | -            |
| 5 d                      | 0,50 a<br>(0,06)              | 0,54 a<br>(0,07) | nd                            | nd                | 14,45 a<br>(2,58)            | 8,23 ab<br>(2,66) | -4,21             | -4,21        | <b>+0,40</b>      | -5,82        |
| 30 d                     | 0,48 a<br>(0,04)              | 0,48 a<br>(0,06) | nd                            | 3,47 ab<br>(5,98) | 9,47 ab<br>(4,16)            | 5,48 ab<br>(2,42) | -4,21             | -0,74        | -4,58             | -8,57        |
| <b>Solo B</b>            |                               |                  |                               |                   |                              |                   |                   |              |                   |              |
| 0 d                      | 0,61 a<br>(0,14)              | 0,61 a<br>(0,14) | 9,90 ab<br>(3,65)             | 9,90 ab<br>(3,65) | 6,25 ab<br>(4,25)            | 6,25 ab<br>(4,25) | -                 | -            | -                 | -            |
| 5 d                      | 0,48 a<br>(0,04)              | 0,43 a<br>(0,04) | 9,40 ab<br>(0,00)             | nd                | 11,51 a<br>(2,11)            | 8,14 ab<br>(3,74) | -0,50             | -9,90        | <b>+5,26</b>      | <b>+1,89</b> |
| 30 d                     | 0,47 a<br>(0,04)              | 0,41 a<br>(0,03) | 6,15 ab<br>(1,56)             | 10,47 a<br>(5,62) | 5,46 ab<br>(1,10)            | 1,52 b<br>(0,61)  | -3,75             | <b>+0,57</b> | -0,79             | -4,74        |
| <b>Fonte de variação</b> | <b><math>N_{total}</math></b> |                  | <b><math>N-NH_4^+</math></b>  |                   | <b><math>N-NO_3^-</math></b> |                   |                   |              |                   |              |
| Solo (S)                 | ns                            |                  | 27,7***                       |                   | 19,9***                      |                   |                   |              |                   |              |
| Data (D)                 | 11,26***                      |                  | 6,4**                         |                   | 10,8***                      |                   |                   |              |                   |              |
| Prof. (P)                | ns                            |                  | ns                            |                   | 8,6**                        |                   |                   |              |                   |              |
| S x D                    | ns                            |                  | ns                            |                   | 3,4*                         |                   |                   |              |                   |              |
| S x P                    | ns                            |                  | ns                            |                   | ns                           |                   |                   |              |                   |              |
| P x D                    | ns                            |                  | 5,3*                          |                   | ns                           |                   |                   |              |                   |              |
| S x D x P                | ns                            |                  | ns                            |                   | ns                           |                   |                   |              |                   |              |

$\Delta N_{min.}$  = N mineralizável  $[(N-NH_4^+)_{t_i} - (N-NH_4^+)_{t_0}]$ ;  $\Delta N_{nit.}$  = N nitrificado  $[(N-NO_3^-)_{t_i} - (N-NO_3^-)_{t_0}]$ ; Prof. 1, 2 = profundidade: 1=0-7,5 cm, 2=7,5-15 cm;  $t_0=0d$ ;  $t_i=5d$ ; 30d; d= dias; nd = não detetado; - = não medido; ns,\*\*\*=valor de F não significativo ( $p \geq 0,05$ ) e significativo a  $p < 0,001$ , respetivamente. (Médias com letras diferentes, na mesma coluna, e para a mesma variável diferem significativamente para  $p < 0,05$ , de acordo com o teste de Bonferroni).

Nestes resultados, o que é de estranhar é o facto da nitrificação potencial ter sido mais elevada no solo alagado, em particular no solo B, aos 5 dias. Este facto pode estar relacionado com o maior teor de areia, o que proporciona um maior arejamento do solo e talvez a uma re-mineralização/nitrificação rápida.

A bibliografia recomenda a incorporação no solo das palhas de arroz até 30 dias antes da sementeira, para que o N esteja disponível para a cultura nas datas de maiores necessidades, e para minimizar as perdas gasosas. Ora, neste trabalho verificou-se que praticamente todo o N disponível no solo foi perdido, 5 ou 30 dias após a incorporação dos resíduos, ficando indisponível para a cultura, muito em especial aos 30 dias (fase de início de afilhamento), uma vez que a incorporação de resíduos foi quase simultânea com a sementeira. O decréscimo significativo do  $N_{inorgânico}$  no solo, ao longo do ciclo cultural, logo após a incorporação dos resíduos, parece confirmar esse resultado.

Após aplicação do algoritmo de Levenberg-Marquardt para determinar o N potencialmente mineralizável no tempo  $t_i$  ou seja a quantidade de N que é mineralizada infinitamente, à temperatura de  $25 \pm 1$  °C e teor de água no solo controlado, obteve-se para o conjunto das duas incubações e ambos os solos, um valor de  $N_0=66,14$  e uma taxa  $k=0,2795 \text{ d}^{-1}$ , resultando a seguinte equação  $N_{min}=66,13536 (1 - e^{-0,27946t})$ ,  $n=72$ ,  $R^2=0,60$  (Fig. 15). O valor de  $k$  indica uma velocidade de decomposição muito rápida, o que parece indicar que os resíduos se mineralizaram rapidamente e o N mineral desapareceu do solo, eventualmente, por perdas gasosas, ou ainda, por "fixação" nos minerais argilosos.

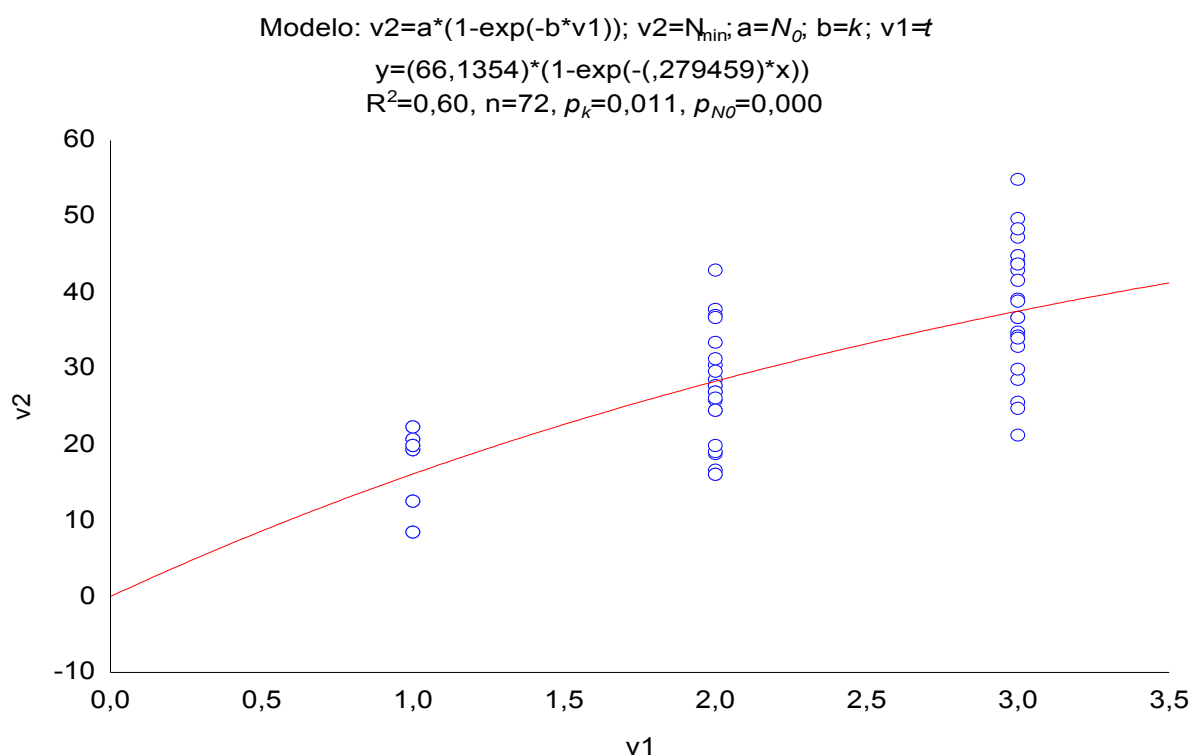


Fig. 15. Mineralização potencial do N, aplicação do algoritmo de Levenberg-Marquardt.

Para cada incubação foi determinado o N potencialmente mineralizável, verificando-se na incubação aeróbia, uma taxa de decomposição muito elevada, apesar do N potencialmente mineralizável ser menor ao determinado para a incubação anaeróbia. Por outro lado, os valores de  $N_0$  e de  $k$  não foram significativos para a incubação anaeróbia (Quadro 14).

Quadro 14. Resultado da aplicação do algoritmo de Levenberg-Marquardt para a incubação aeróbia, anaeróbia e ambas, na profundidade 0-15 cm

| Fonte de variação   | Prof. (cm) | $N_0$                  | $k$ ( $d^{-1}$ )      | $R^2$ | n  |
|---------------------|------------|------------------------|-----------------------|-------|----|
| Incubação aeróbia   | 0-15       | 46,332 ( $p < 0,001$ ) | 0,411 ( $p = 0,013$ ) | 0,55  | 36 |
| Incubação anaeróbia | 0-15       | 98,31476 (ns)          | 0,187 (ns)            | 0,71  | 36 |
| Ambas as incubações | 0-15       | 66,135 ( $p < 0,001$ ) | 0,280 ( $p = 0,011$ ) | 0,60  | 72 |

Prof.=profundidade;  $N_0$ =N potencialmente mineralizável no  $t_0$ ;  $k$ =constante da velocidade de decomposição;  $R^2$ =coeficiente de determinação; n=número de observações; ns=não significativo.

## 4.2. Lâmina de água

### 4.2.1. Composição físico-química da lâmina de água, durante o ciclo do arroz

As características físico-químicas da lâmina de água não diferiram significativamente entre solos (A e B), nem entre datas de amostragem. Por esta razão, apresentam-se no Quadro 15 as médias e desvios-padrão de cada característica analisada.

Quadro 15. Algumas características físico-químicas medidas nas lâminas de água, à superfície dos dois solos testados (2010)

| Fonte de variação  | pH            | CE<br>$mS\ cm^{-1}$ | $Ca^{2+}$       | $Mg^{2+}$       | $Na^+$          | $Cl^-$            | $K^+$         |
|--------------------|---------------|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|---------------|
|                    |               |                     | (mg $l^{-1}$ )  |                 |                 |                   |               |
|                    | 8,1<br>(0,17) | 0,6<br>(0,37)       | 32,3<br>(21,75) | 13,4<br>(10,37) | 80,5<br>(40,92) | 115,18<br>(51,41) | 5,2<br>(3,30) |
| ANOVA              |               |                     |                 |                 |                 |                   |               |
| Solo               | ns            | ns                  | ns              | ns              | ns              | ns                | ns            |
| Data de amostragem | ns            | ns                  | ns              | ns              | ns              | ns                | ns            |

Os valores apresentados na primeira linha correspondem aos valores médios das cinco amostragens ao longo do ciclo cultural e respetivos desvios-padrão, entre parêntesis; ns= valores de  $F$  não significativos ( $p \geq 0,05$ ).

O pH da água apresentou-se ligeiramente alcalino e o valor médio da CE classifica a água à superfície dos dois solos como sendo de salinidade média (Ayers & Westcot, 1985). Para o arroz, cultura moderadamente sensível à salinidade, o limite crítico (valor para a partir do qual se verifica redução do crescimento) é de 3,0  $mS\ cm^{-1}$  (Tanji & Kielen, 2002). As concentrações de  $Na^+$  e  $Cl^-$  nas lâminas de água eram muito elevadas (Ayers & Westcot, 1976, 1985; Decreto-lei n.º 236/98).

Os teores de  $N-NH_4^+$  obtidos nessas lâminas de água foram residuais e não diferiram significativamente entre solos (Quadro 16), tendo-se verificado um aumento significativo apenas na última data de amostragem (15 de setembro). Por outro lado, os teores de  $N-NO_3^-$  foram significativamente superiores no solo B (Quadro 16), mas mantiveram-se sempre baixos. Os valores nas duas primeiras amostragens foram residuais, com um aumento significativo na 3ª colheita (após adubação de cobertura) e na última data (antes da drenagem do solo). Na última data, o teor de  $N-NO_3^-$  mais elevado poderá ser devido a alguma nitrificação do  $N-NH_4^+$  no solo.

Quadro 16. Resultados da ANOVA ("Main-effects") e separação das médias dos teores de  $\text{N-NH}_4^+$  e  $\text{N-NO}_3^-$  nas lâminas de água à superfície dos solos A e B, durante o ciclo cultural do arroz (2010)

| Fonte variação                       | $\text{N-NH}_4^+$     | $\text{N-NO}_3^-$ |
|--------------------------------------|-----------------------|-------------------|
|                                      | (mg l <sup>-1</sup> ) |                   |
| Solo                                 |                       |                   |
| A                                    | 0,25a                 | 1,02b             |
| B                                    | 0,27a                 | 1,52a             |
| Data                                 |                       |                   |
| 24 maio                              | 0,13b                 | 0,41c             |
| 16 junho                             | 0,20b                 | 0,40c             |
| 30 junho - solo A; 14 julho - solo B | 0,19b                 | 2,06a             |
| 17 agosto                            | 0,12b                 | 1,43b             |
| 15 setembro                          | 0,64a                 | 2,05a             |
| ANOVA                                |                       |                   |
| Solo                                 | ns                    | 279,35***         |
| Data                                 | 97,31***              | 636,30***         |
| Solo x Data                          | 5,14*                 | 204,43***         |

ns, \*, \*\*\*= valores de  $F$  não significativos ( $p \geq 0,05$ ), e significativos a  $p < 0,05$  e  $p < 0,001$ , respetivamente; médias com letras diferentes na mesma coluna, e para o mesmo fator diferem significativamente para  $p < 0,05$ , de acordo com o teste de Bonferroni.

O teor de  $\text{N-NO}_3^-$  na lâmina de água à superfície do solo A, nas primeiras duas datas de amostragem foi residual, apresentando um valor médio de  $0,45 \text{ mg l}^{-1}$  (Fig. 16). No período imediatamente a seguir à adubação de cobertura, a 30 de junho, ocorreu um aumento para um teor significativamente superior ( $2,25 \text{ mg l}^{-1}$ ), verificando-se posteriormente (17 de agosto), um decréscimo para um teor idêntico ao inicial. Seguiu-se novo acréscimo significativo na última data de amostragem (final do alagamento), possivelmente devido a alguma nitrificação no solo.

No solo B verificou-se um aumento significativo dos teores de  $\text{N-NO}_3^-$  após a segunda amostragem, com um valor máximo significativamente superior ( $2,75 \text{ mg l}^{-1}$ ) na última data de amostragem (Fig. 16). Após a adubação de cobertura (12 de julho), os teores de  $\text{N-NO}_3^-$  na água subiram significativamente até ao final do período de alagamento, talvez devido a maior difusão de  $\text{O}_2$  no aerênquima dado o maior desenvolvimento da planta, em especial da raiz. De salientar que os teores de nitratos nas duas primeiras datas de amostragem foram semelhantes (residuais) em ambos os solos. De acordo com os dados da incubação anaeróbia, neste solo, ao afilhamento esperam-se valores de  $\text{N-NO}_3^-$  no solo, resultante da decomposição dos resíduos.

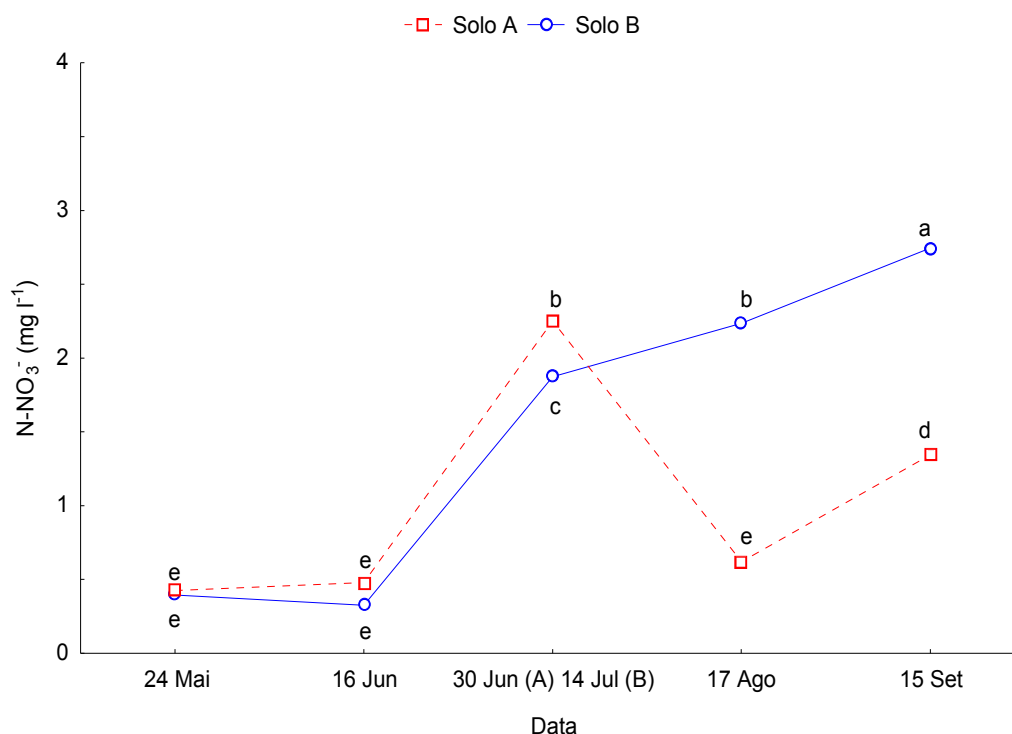


Fig. 16. Interação solo x data sobre os teores de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> nas lâminas de água à superfície dos solos A e B (2010). (Médias com letras diferentes diferem significativamente ( $p < 0,05$ ), para ambos os solos de acordo com o teste de Bonferroni).

Apesar de a água de rega no solo A (subterrânea) apresentar teores de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> relativamente elevados (9,5 mg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> l<sup>-1</sup>), mas inferior ao limite de 50 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup> l<sup>-1</sup> permitido por lei para uma água de rega (Quadro 10), e a água de rega utilizada no solo B conter cerca de metade dessa concentração (4,9 mg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> l<sup>-1</sup>), os teores de N encontrados ao longo do ciclo cultural do arroz na lâmina de água à superfície dos solos foram bastante mais baixos, devido à sua utilização pelas plantas e microrganismos, bem como as algas, ou, ainda, devido a perdas por desnitrificação (Reddy & Patrick, 1984).

### 4.3. Material vegetal

#### 4.3.1. Produtividade

Da análise de variância dos resultados obtidos (Quadro 17), apenas se observaram diferenças significativas na produção de matéria seca (MS) entre os vários órgãos da planta. Os solos não conduziram a uma produtividade significativamente diferente (12 796 kg MS ha<sup>-1</sup>).

Verificou-se, como seria de esperar para a cultura do arroz, uma maior produção de MS na panícula, ou seja, obteve-se uma produtividade média de grão, nos dois solos, de aproximadamente 5,6 t ha<sup>-1</sup> (Quadro 17), igual à média nacional no ano de 2010. Porém, também se verificou que a produção de MS dos caules e folhas, que se aproximou das 5 t ha<sup>-1</sup>, não diferiu significativamente da produção obtida nas panículas. O valor de MS obtido nas raízes representou 17,5% do total de matéria seca produzida pela planta completa. Esta percentagem é ligeiramente mais elevada que a referida na bibliografia (11%) (Portero, 2001).

Quadro 17. Resultado da ANOVA (MLG) e separação de médias (desvios-padrão) da matéria seca (kg MS ha<sup>-1</sup>) produzida nos diferentes órgãos da planta de arroz, nos solos A e B

| Fonte de variação      | Matéria seca<br>(kg MS ha <sup>-1</sup> ) |
|------------------------|---|
| Solo                   |   |
| A                      | 13684,6 a<br>(1687,6)                     |
| B                      | 11906,9 a<br>(2894,5)                     |
| Órgão da planta        |   |
| Panícula               | 5582 a<br>(935)                           |
| Caule+folhas           | 4969 a<br>(1143)                          |
| Raiz                   | 2245 b<br>(388)                           |
| ANOVA                  |   |
| Solo                   | ns  |
| Órgão da planta        | 25,23***                                  |
| Solo x Órgão da planta | ns  |

ns, \*\*\*=valores de  $F$  não significativos ( $p \geq 0,05$ ), e significativos a  $p < 0,001$ , respetivamente; médias com letras diferentes na mesma coluna, e para o mesmo fator, diferem significativamente para  $p < 0,05$  (teste de Bonferroni).

Estimando a EA, ou seja, a relação da produção de grão (kg ha<sup>-1</sup>) por unidade de fertilizante aplicado, verificou-se uma eficiência de 47%, valor ligeiramente inferior ao IC (53%).

## 4.3.2. Teor de N no material vegetal

### 4.3.2.1. Leituras SPAD

Ao longo do ciclo cultural do arroz, os valores SPAD medidos nas folhas “Y” das plantas variaram significativamente ( $p < 0,001$ ), aumentando até à fase de maturação do grão. Entre solos, não ocorreu variação significativa destas leituras (Quadro 18).

Quadro 18. Resultados da ANOVA (MLG) e separação de médias dos valores SPAD determinados na folha “Y” das plantas de arroz, em ambos os solos A e B

| Fonte de variação             | Valor SPAD |
|-------------------------------|------------|
| Solo                          |            |
| A                             | 38,5 a     |
| B                             | 39,0 a     |
| Fase do ciclo cultural        |            |
| 2 folhas                      | 30,5 d     |
| 4 folhas                      | 35,9 c     |
| afilhamento (início)          | 36,2 c     |
| afilhamento (meio)            | 40,0 b     |
| afilhamento (fim)             | 40,5 b     |
| emborrachamento               | 39,7 b     |
| floração                      | 43,7 a     |
| grão leitoso                  | 43,8 a     |
| ANOVA                         |            |
| Solo                          | ns         |
| Fase do ciclo cultural        | 58,44***   |
| Solo x Fase do ciclo cultural | 4,27***    |

ns, \*\*\*=valores de  $F$  não significativos ( $p \geq 0,05$ ), e significativos a  $p < 0,001$ , respetivamente; médias com letras diferentes na mesma coluna, e para o mesmo fator, diferem significativamente para  $p < 0,05$  (teste de Bonferroni).

De acordo com Balasubramanian *et al.* (1999) e Dobermann & Fairhurst (2000), o teor de  $1,4 \text{ g N m}^{-2}$  de área da folha do arroz é o valor crítico abaixo do qual a produtividade diminui. As folhas de arroz com este teor de N apresentavam uma leitura SPAD de 35.

No solo A, determinaram-se valores muito próximos do valor crítico de referência nas fases de 4 folhas e início do afilhamento (dados não apresentados). Este facto poderá estar relacionado com a competição pelo N por parte de infestantes (milhã do arroz, *Echinochloa oryzoides*) neste solo. Após o controlo da infestante, os valores SPAD registados foram superiores a 38 (Fig. 17).

No solo B não se verificaram problemas graves com infestantes na fase inicial de desenvolvimento do arroz e os valores SPAD registados a partir da 4.<sup>a</sup> folha foram sempre superiores ao valor crítico (Fig. 17).

Os valores mais baixos observados na fase de 2 folhas justificam-se por terem sido obtidos antes do período recomendado para o registo das leituras (21 dias após a sementeira) por Balasubramanian *et al.* (1999) e Dobermann & Fairhurst (2000), ou mesmo, um mês após germinação (Ladha *et al.*, 2005). Nesta fase, a planta ainda apresenta um desenvolvimento muito precoce.

Na fase de formação da panícula, e para uma produtividade esperada de 6 - 8 t ha<sup>-1</sup>, com uma leitura SPAD superior a 34, Dobermann & Fairhurst (2000), recomendam a aplicação de 50 kg N ha<sup>-1</sup>. No presente estudo não foi realizada qualquer aplicação de N após o afilhamento, não se verificando, contudo, diminuição da concentração de N nas folhas, em ambos os solos (Fig. 17). No entanto, a produtividade observada foi apenas de 5,6 t ha<sup>-1</sup> (Quadro 17).

No presente estudo, valores SPAD entre os 37 e 43 indicam que a planta apresenta níveis crescentes de N na folha, sendo provável que a planta ainda responda a uma segunda adubação de cobertura.

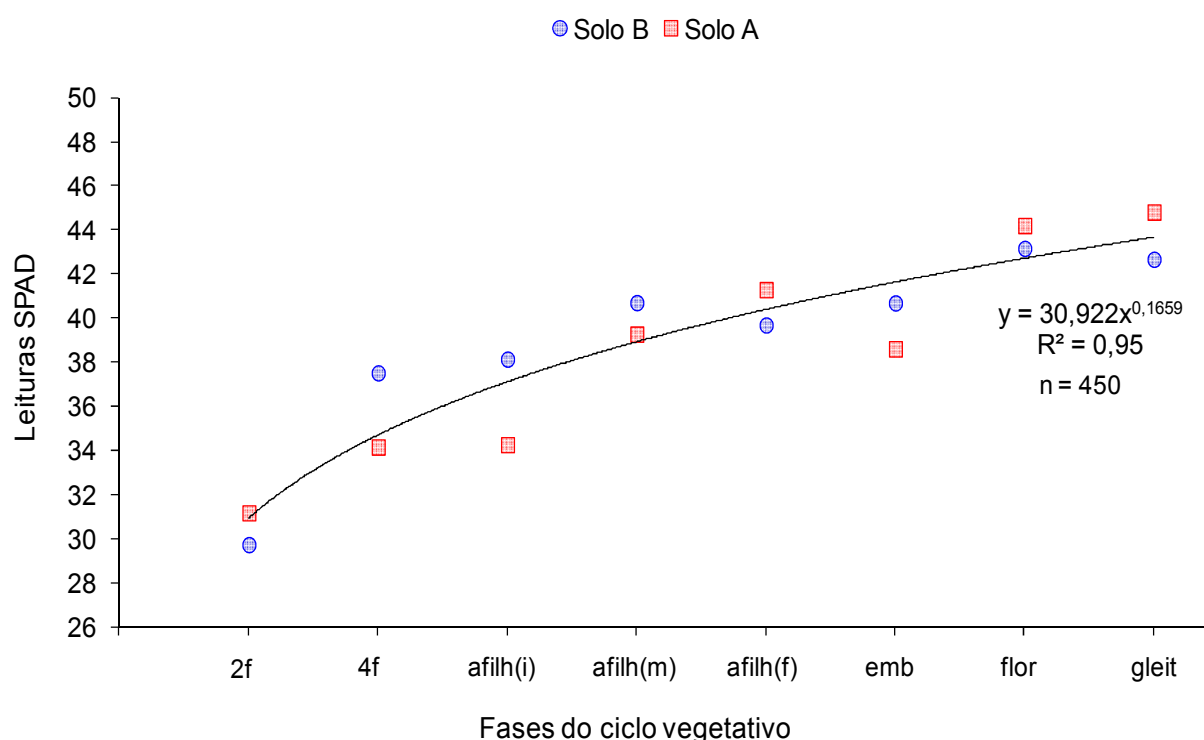


Fig. 17. Valores SPAD determinados nas folhas “Y” da planta de arroz, nos dois solos e curva de regressão ajustada. (2f=2 folhas, 4f=4 folhas, afilh(i)=início afilhamento, afilh(m)=meio do afilhamento, afilh(f)=final afilhamento, emb=emborrachamento, flor=floração, gleit=grão leitoso; R<sup>2</sup>=coeficiente de determinação).

#### 4.3.2.2. Teor de N<sub>total</sub> (g kg<sup>-1</sup> MS) e N<sub>exportado</sub> ( kg N ha<sup>-1</sup>) na planta

O teor de azoto total (g N kg<sup>-1</sup> MS) contido no material vegetal das plantas de arroz colhidas na fase de maturação não diferiu significativamente nos dois solos em estudo (Quadro 19). No que se refere aos diferentes órgãos da planta, verificou-se um teor de N significativamente superior na panícula (11,3 g N kg<sup>-1</sup> MS), indicando a mobilização do nutriente para este órgão da planta (na fase final do ciclo cultural do arroz) (Quadro 20). O conjunto caules + folhas e a raiz apresentaram concentrações de N idênticas (6,6 g N kg<sup>-1</sup> MS). No solo A, o valor de N total na raiz foi significativamente superior ao determinado nas raízes do solo B (Quadro 20). Nos outros órgãos da planta não se notaram diferenças significativas entre os teores de N<sub>total</sub> nos dois solos (Quadro 20).

Quadro 19. Resultado da ANOVA (MLG) e separação de médias do  $N_{total}$  ( $g\ N\ kg^{-1}$ ) e  $N_{exportado}$  ( $kg\ N\ ha^{-1}$ ) pelos diferentes órgãos da planta de arroz produzida nos dois solos A e B, e resultado de "One-way ANOVA" para o N total exportado ( $kg\ N\ ha^{-1}$ ) pela planta completa

| Fonte de variação      | $N_{total}$<br>( $g\ N\ kg^{-1}$ ) | $N_{exportado}$<br>( $kg\ N\ ha^{-1}$ ) | $N_{total\ exportado}$<br>( $kg\ N\ ha^{-1}$ ) |
|------------------------|------------------------------------|---|--|
| Solo                   |                                    |   |  |
| A                      | 8,2 a<br>(2,15)                    | 38,2 a<br>(20,33)                       | 115 a<br>(14,40)                               |
| B                      | 8,0 a<br>(2,85)                    | 35,2 a<br>(24,52)                       | 106 a<br>(31,66)                               |
| Órgão da planta        |                                    |   |  |
| Raiz                   | 6,7 b<br>(1,28)                    | 15,2 c<br>(4,03)                        | -  |
| Caule+folhas           | 6,4 b<br>(0,81)                    | 32,1 b<br>(8,13)                        | -  |
| Panícula               | 11,3 a<br>(0,72)                   | 63,0 a<br>(11,78)                       | -  |
| ANOVA                  |                                    |   |  |
| Solo                   | ns                                 | ns                                      | ns   |
| Órgão da planta        | 132,43***                          | 40,59***                                | -  |
| Solo x Órgão da planta | 14,97***                           | ns                                      | -  |

-= não determinado; ns, \*\*\*=valores de  $F$  não significativos ( $p \geq 0,05$ ), e significativos a  $p < 0,001$ , respetivamente; médias com letras diferentes na mesma coluna, e para o mesmo fator, diferem significativamente para  $p < 0,05$  (teste de Bonferroni).

A produtividade do grão em ambos os solos de Salvaterra de Magos foi semelhante à média nacional ( $5,6\ t\ ha^{-1}$ ), mas inferior à referida na bibliografia ( $6 - 8\ t\ ha^{-1}$ ) (Lægread *et al.*, 1999). Vários fatores podem ter contribuído para essa produtividade menor: características da cultivar (genótipo), a gestão dos resíduos no solo, a gestão da lâmina de água e a aplicação do N faseado em apenas duas aplicações. Os teores de  $N_{total}$  encontrados na panícula ( $11,3\ g\ N\ kg^{-1}$ ) e no caule+folhas ( $6,4\ g\ N\ kg^{-1}$ ) encontram-se dentro do intervalo de valores normais referidos na bibliografia (grão:  $9 - 12\ g\ N\ kg^{-1}$  e palha:  $6 - 8\ g\ N\ kg^{-1}$ ) (Dobermann & Fairhurst, 2000; Ladha *et al.*, 2005), indicando que a cultivar Ariete apresentou uma boa taxa de absorção do nutriente (eficiente absorção de N) e eficiente uso fisiológico do N. A eficiência de recuperação do N na planta foi de 92%, e de 53% no grão, inferior ao indicado por Mikkelsen *et al.* (1995), isto é, cerca de 2/3 do N aplicado deveriam ser recuperados no grão. No caso presente, isso representaria  $80\ kg\ N\ ha^{-1}$ , superior ao valor determinado neste estudo ( $63\ kg\ N\ ha^{-1}$ ) (Quadro 19).

Quadro 20. Valores da interação do teor de  $N_{total}$  ( $g\ N\ kg^{-1}$ ) nos vários órgãos da planta de arroz cultivada e os solos (A e B)

| Órgãos da planta | $N_{total}$ ( $g\ kg^{-1}$ ) |        |
|------------------|------------------------------|--------|
|                  | Solo A                       | Solo B |
| Raiz             | 7,9 a                        | 5,6 c  |
| Caule e Folhas   | 6,0 c                        | 6,9 bc |
| Panícula         | 10,9 a                       | 11,6 a |

Médias com letras diferentes, diferem significativamente para  $p < 0,05$ , de acordo com teste de Bonferroni.

No que diz respeito ao  $N_{exportado}$  pela planta completa, não se verificaram diferenças significativas entre os dois solos ( $110,5\ kg\ N\ ha^{-1}$ ). As panículas apresentaram uma exportação superior do N ( $63\ kg\ N\ ha^{-1}$ ) comparativamente com os caules+folhas ( $32,1\ kg\ N\ ha^{-1}$ ) e a raiz ( $15,2\ kg\ N\ ha^{-1}$ ) (Quadro 19), como resultado da maior concentração de N naquele órgão, e também da maior produção de biomassa.

## 5. Conclusões

Esta foi uma primeira abordagem ao sistema de campos alagados para produção de arroz, pelo que os dados obtidos devem ser confirmados em futuros estudos. Estudaram-se duas parcelas do COTArroz que se suponha corresponderem a dois solos distintos quanto à sua textura, o que não se veio a revelar.

Nos estudos da mineralização potencial do N no solo melhorado com as palhas de arroz, verificou-se a existência de 80 - 120 kg de N disponível no solo até aos 30 dias, correspondentes ao início do afilamento. A velocidade de decomposição do N orgânico no solo foi muito elevada, denotando uma possível decomposição linear dos resíduos neste período.

Há necessidade de se prolongarem os estudos de incubação por períodos mais alargados para obtenção de um melhor ajustamento dos dados.

Nas fases de maior absorção de N pela cultura, isto é, após o período vegetativo, o teor de  $N_{\text{inorgânico}}$  no solo diminuiu significativamente para valores idênticos aos iniciais. Os teores de  $N\text{-NO}_3^-$  nas duas parcelas tiveram o mesmo padrão de evolução ao longo do ciclo cultural, e foram significativamente menores que os de  $N\text{-NH}_4^+$ .

Os valores SPAD indicam que as plantas estavam bem nutridas do ponto de vista azotado, em ambas as parcelas. A produção de grão não diferiu da média nacional (2010).

A eficiência de recuperação do nutriente pela cultura foi muito elevada (92%), muito provavelmente devido a outras fontes azotadas, para além do N mineral fornecido.

Verificou-se um IC igual à RE (53%), ou seja a relação entre o peso do grão e restante biomassa aérea foi idêntica à relação entre a concentração de N na planta e a dose de N aplicada.

A eficiência fisiológica do N recuperado no grão ( $63 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) poderá ser melhorada (de acordo com a bibliografia) se o N for aplicado fracionadamente em mais do que uma cobertura (ex. afilamento e início da floração) e eventualmente recorrendo a cultivares com uma melhor eficiência fisiológica. No entanto, o fraccionamento do fertilizante deve ser bem ponderado, tendo em atenção a susceptibilidade da cultivar à acama, bem como os custos económicos inerentes à sua aplicação.

Os resultados obtidos neste trabalho são um importante ponto de partida para o aprofundamento do estudo do comportamento do N nos arrozais portugueses, em canteiros alagados, e a eficiência do uso do nutriente pela planta. Será necessário quantificar as emissões gasosas e o azoto amoniacal “fixado” nos minerais argilosos do tipo 2:1 para estimar as potenciais perdas no sistema, bem como determinar a actividade enzimática, a biomassa microbiana e a presença de cianobactérias no solo.

## 6. Bibliografia

- AAVM (Associação de Agricultores do Vale do Mondego) 2010 – *Caderno de Especificações: Arroz Carolino do Baixo Mondego*. Montemor-o-Velho. 138 pp.
- Ayers, R.S. & Westcot, D.W. 1976 – *Calidad del Agua para la Agricultura*. FAO. Roma
- Ayers, R.S. & Westcot, D.W. 1985 – *Water Quality for Agriculture*. FAO. Rome <http://www.fao.org/DOCREP/003/T0234E/T0234E00.htm>
- Bahmaniar, M.A. 2008 – The influence of continuous rice cultivation and different waterlogging periods on the morphology, clay mineralogy, Eh, pH and K in paddy soils. *Eurasian Soil Science* 41: 87–92.
- Bajwa, S.G.; Mishra, A & Norman, R.J. 2010 – Plant nitrogen accumulation dynamics in rice in response to nitrogen management. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 41: 454-471.
- Balasubramanian, V.; Morales, A.C.; Cruz R.T. & Abdulrachman S. 1999 – On-farm adaptation of knowledge-intensive nitrogen management technologies for rice systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 53: 59-69.
- Barry, G. 2005 – *Golden Rice*. Rice fact sheet. International Rice Research Institute (IRRI). [http://www.knowledgebank.irri.org/factsheetsPDFs/Health\\_and\\_Nutrition/fs\\_Golden\\_Rice.pdf](http://www.knowledgebank.irri.org/factsheetsPDFs/Health_and_Nutrition/fs_Golden_Rice.pdf)
- Baruah, K.K.; Gogoi, B. & Gogoi, P. 2010 - Plant physiological and soil characteristics associated with methane and nitrous oxide emission from rice paddy. *Physiology and Molecular Biology of Plants* 16: 79-91.
- Bouman, B.A.M.; Lampayan, R.M.; Tuong, T.P. 2007 – *Water Management in Irrigated Rice: Coping With Water Scarcity*. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines, 54 pp.
- Bouyoucos, G.J. 1936. Directions for Making Mechanical Analysis of Soils by the Hydrometer Method. *Soil Science* 42: 225-230.
- Carranca, C. 1986 – *Nitrogen Availability and Ammonium Fixation in Some Maize Cultivated Soils of Portugal*. Thesis for M. Sc. in Soil Science (Agric. Univ. of Norway). Oeiras, 89 pp.
- Carranca, C. 1996 – *Avaliação de Alguns Processos do Ciclo do Azoto em Solos Portugueses, Designadamente Através do Marcador <sup>15</sup>N*. Tese de Doutoramento em Engenharia Agronómica. Universidade Técnica de Lisboa, ISA, Lisboa, 225 pp.
- Carranca, C. 2000. *Principais Processos do Ciclo do Azoto numa Agricultura Sustentável. Avaliação Através do Marcador <sup>15</sup>N*. Edição INIA/Fundo Social Europeu de Orientação e Garantia Agrícola EAN, Oeiras. 118pp.
- Carranca, C. 2010 – *Gestão Eficiente do Azoto e Matéria Orgânica na Produção Vegetal e na Sustentabilidade dos Ecossistemas Agrários*. Programa de Investigação para o Exercício de Habilitação de Coordenação Científica da Carreira de Investigação do INIA, Oeiras, 178 pp.
- Carranca, C.; Rocha, I.; De Varennes, A.; Oliveira, A.; Pampulha, M.E. & Torres, M.O. 2009 – Effect of tillage and temperature on nitrogen mineralization and microbial activity and microbial numbers of lupine amended soil. *Agrochimica* 53:183-195.
- Cass, A.; Gusli, S. & Macleod, D.A. 1994 – Sustainability of soil structure quality in rice paddy-soybean cropping systems in South Sulawesi, Indonesia. *Soil and Tillage Research* 31: 339-352.

- Cassman, K.G.; Kropff, M.J.; Gaunt, J. & Peng, S. 1993 – Nitrogen use efficiency of rice reconsidered: what are the key constraints? *Plant and Soil* 115/156: 359-362.
- Chen, H.W.; Yen, J.H.; Chung, R.S.; Lai, C.M.; Yang, S.S.; & Wang, Y.S. 2001 - Carbon dioxide flux density in cultivated rice paddy field. *Proceedings of the National Science Council, Republic of China* 25: 239-47.
- Childs, N. & Baldwin, K. 2010 – Price Spikes in Global Rice Markets Benefit U.S. Growers, at Least in the Short Term. *Amber Waves* 8: 32-37.
- Choudhury, A.T.M.A. & Kennedy, I.R. 2005 – Nitrogen fertilizer losses from rice soils and control of environmental pollution problems. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 36: 1625-1639.
- Cole, C.V.; Cerri, C.; Minami, K.; Mosier, A.; Rosenberg, N.; Sauerbeck, D.; Dumanski, D.; Duxbury, J.; Freney, J.; Gupta, R.; Heinemeyer, O.; Kolchugina, T.; Lee, J.; Paustian, K.; Powlson, D.; Sampson, N.; Tiessen, H.; Noordwijk, M.V. & Zhao, Q. 1996 – Agricultural options for mitigation of greenhouse gas emissions. In: Watson, R.T.; Zinyowera, M.C. & Moss, R.H. (eds) *Climate Change 1995. Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific Technical Analyses*. Published for the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge, pp 745–771.
- Coleman, D.C.; Crossley Jr, D.A. & Hendrix, P.F. 2004 - *Fundamentals of Soil Ecology*. Elsevier Academic Press, California, 408 pp.
- Conen, F.; Smith, K. A. & Yagi, K. 2010 – Rice cultivation. In: Ready, D.; Smith, P. & Amstel, A. (Eds.) *Methane and Climate Change*. Earthscan. London, pp. 115 – 135.
- Conklin, A.R.; Stilwell, T. 2007. *World Food: Production and Use*. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey, 445 pp.
- Dan, J.; Krüger, M.; Frenzel, P. & Conrad, R. 2001 – Effect of a late season urea fertilization on methane emission from a rice field in Italy. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 83: 191-199.
- Datta S.K.; Datta, K.; Parkhi, V.; Rai, M.; Baisakh, N.; Sahoo, G.; Rehana, S.; Bandyopadhyay, A.; Alamgir, Md.; Ali, Md.S.; Abrigo, E.; Oliva, N. & Torrizo, L. 2007 – Golden rice introgression, breeding and field evaluation. *Euphytica* 154: 271-278.
- De Datta, S.K. 1981 – *Principles and Practices of Rice Production*. John Wiley & Sons, Inc., Singapoure, 618pp.
- De Datta, S.K. 1985 – Availability and management of nitrogen in lowland rice in relation to soil characteristics. In: IRRI (ed.) *Wetland Soils: Characterization, Classification, and Utilization*. International Rice Research Institute. Los Baños, Philippines, pp. 247-267.
- De Datta, S.K. 1987 – Advances in soil fertility research and nitrogen fertilizer management for lowland rice. In: IRRI (ed.) *Efficiency of Nitrogen Fertilizers for Rice*. International Rice Research Institute. Los Baños, Philippines, pp. 27-41.
- De Datta, S.K. 1995 – Nitrogen transformations in wetland rice ecosystems. *Fertilizer Research* 42: 193-203.
- De Varennes, A. 2003 – *Produtividade dos Solos e Ambiente*. Escolar Editora, Lisboa, 490pp.
- Decreto-lei n.º 236/98 *Diário da República* n.º 176, Série I, parte A de 1 de agosto de 1998.
- Decreto-lei n.º 62/2000 *Diário da República* n.º 93, Série I, parte A de 19 de abril de 2000.

- Dewis, J. & Freitas, F. 1970 – Physical and chemical methods of soil and water analysis. FAO. Soil Bulletin 10.
- Dobermann, A. & Fairhurst, T. 2000 – *Rice: Nutrient Disorders & Nutrient Management*. Potash & Phosphate Institute (PPI), Potash & Phosphate Institute of Canada (PPIC) and International Rice Research Institute (IRRI). 201pp.
- Edirisinghe, J. & Bambaradeniya, C. 2006 – Rice fields: an ecosystem rich in biodiversity. *Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka* 34: 57-59.
- El-Sharkawi, H.; Honna, T.; Yamamoto, S. & Eneji, A. 2007 – Biological nitrogen fixation by native microorganisms in a waste-amended paddy soil. *Journal of Sustainable Agriculture* 29: 23-38.
- Espinoza, L.; Norman, R.; Slaton, N. & Daniels, M. 2005 – *The nitrogen and phosphorous cycle in soils*. University of Arkansas Cooperative Extension Service, 4pp. [http://www.uaex.edu/Other\\_Areas/publications/PDF/FSA-2148.pdf](http://www.uaex.edu/Other_Areas/publications/PDF/FSA-2148.pdf)
- EUROSTAT 2010. Crops Products (annual data) [http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/statistics/search\\_database](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/statistics/search_database)
- Fageria, N.K. 2009 – *The Use of Nutrients in Crop Plants*. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 430 pp.
- Fageria, N.K.; Slaton, N.A. & Baligar, V.C. 2003 – Nutrient management for improving lowland rice productivity and sustainability. In: Sparks, D. (ed.) *Advances in Agronomy* Vol. 80, Academic Press, pp. 63-152.
- FAO 2004a – Rice and human nutrition. *Fact sheet* 3. International Year of Rice.
- FAO 2004b – Aquatic biodiversity in rice fields. *Fact sheet* 7. International Year of Rice
- FAOSTAT 2010 – Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://faostat.fao.org/>
- Ferrero, A. 2007 - Rice scenario in the European Union. *Cahiers Agricultures* 16: 272-277.
- Figueiredo, N; Fareleira, P.; Menino, R.; Marques, P.; Vargues, A. & Carranca, C. 2011 – A produção de arroz em Portugal. In: *Livro das Comemorações dos 75 Anos da Estação Agronómica Nacional em 2011*. Oeiras. (em publicação)
- Fillery, I.R.P. & Vlek, P.L.G. 1982 - The significance of denitrification of applied nitrogen in fallow and cropped rice soils under different flooding regimes I. Greenhouse experiments. *Plant and Soil* 65: 153-169.
- Fuller, D.Q. ; Qin, L.; Zheng, Y.; Zhao, Z.; Chen, X.; Hosoya, L.A. & Sun, G. 2009 – The domestication process and domestication rate in rice: Spikelet bases from the Lower Yangtze. *Science* 323: 1607-1610.
- Glaszmann, J.1987 – Isozymes and classification of Asian rice varieties. *Theoretical and Applied Genetics* 74:21-30.
- Goff, S.A.; Ricke, D.; Lan, T.; Presting, G.; Wang, R.; Dunn, M; Glazebrook, J.; Sessions, A.; Oeller, P.; Varma, H.; Hadley, D.; Hutchison, D. ; Martin, C.; Katagiri, F. ; Lange, B. ; Moughamer, T.; Xia, Y.; Budworth, P.; Zhong, J.; Miguel, T.; Paszkowski, U.; Zhang, S.; Colbert, M.; Sun, W.; Chen, L.; Cooper, B.; Park, S.; Wood, T.; Mao, L.; Quail, P.; Wing, R.; Dean, R.; Yu, Y.; Zharkikh, A.; Shen, R.; Sahasrabudhe, S.; Thomas, A.; Cannings, R.; Gutin, A.; Pruss, D.; Reid, J.; Tavtigian, S.; Mitchell, J.; Eldredge, G.; Scholl, T.; Miller, R.; Bhatnagar, S.; Adey, N.; Rubano, T.; Tusneem, N.; Robinson, R.; Feldhaus, J.; Macalima, T.; Oliphant, A. & Briggs, S. 2002 – A Draft Sequence of the Rice Genome (*Oryza sativa* L. ssp. *Japonica*). *Science* 296: 92-100.

- Gomes, M.P. & Silva, A.A. 1962 – Um novo diagrama triangular para a classificação básica da textura do solo. *Garcia da Orta* 10: 171-179.
- Gowda, V.R.P.; Henry, A. Yamauchi, A; Shashidhar, H.E. & Serraj, R. 2011 – Root biology and genetic improvement for drought avoidance in rice. *Field Crops Research* 122: 1–13
- GPP (Gabinete de Planeamento e Políticas) 2007 – *Culturas arvenses: Diagnóstico sectorial*. Ministério da Agricultura, do Desenvolvimento Rural e das Pescas, 58 pp.
- Graham, R. 2004 – Human Nutrition and Rice. Rice fact sheet. International Rice Research Institute (IRRI). [http://www.knowledgebank.irri.org/factsheetsPDFs/Health\\_and\\_Nutrition/fs\\_nutrition.pdf](http://www.knowledgebank.irri.org/factsheetsPDFs/Health_and_Nutrition/fs_nutrition.pdf)
- Halwart, M. 2006 – Biodiversity and nutrition in rice-based aquatic ecosystems. *Journal of Food Composition and Analysis* 19: 747-751.
- Helms, R.S. & Bernhardt, J.L. 2000 – Causes of “White Heads” in Rice. *In*: Norman, G. (Ed.) 2000 *Texas Rice Production Guidelines*. Texas Agricultural Extension Service, EUA, pp. 45 – 46.
- Hijmans, R. 2007 – The where and how of rice. *Rice Today* 6:19-20.
- Holzschuh, M.J.; Bohnen, H. & Anghinoni I. 2010 - Avaliação da porosidade e placa férrica de raízes de arroz cultivado em hipoxia. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 34:1763-1769.
- Houba, V.J.G., Van der Lee, J.J. & Novozamsky, I. 1995. *Soil Analysis Procedures – Other Procedures*, part 5B, 6th edition. Department of Soil Science and Plant Nutrition, Wageningen Agricultural University, The Netherlands.
- IM (Instituto de Meteorologia) 2011 – Normais Climatológicas 1971-2000. <http://www.meteo.pt/pt/oclima/clima.normais/>
- INE (Instituto Nacional de Estatística) 2010 (<http://www.ine.pt>)
- INSA (Instituto Nacional de Saúde Dr. Ricardo Jorge) 2010 – Tabela de composição dos alimentos. [www.insa.pt](http://www.insa.pt)
- IRGSP (International Rice Genome Sequencing Project) 2005 – The map-based sequence of the rice genome. *Nature* 436: 793-800.
- ISO 10694:1995 – Soil quality-Determination of organic and total carbon after dry combustion (“elemental analysis”). International Organization for Standardization, Genève, 7pp.
- ISO 13878:1998 – Soil quality-Determination of total nitrogen content by dry combustion (“elemental analysis”). International Organization for Standardization, Genève, 5pp.
- ISO 9297, 1989 - Water quality - Determination of chloride - Silver nitrate titration with chromate indicator (Mohr's method). International Organization for Standardization, Genève, 4pp.
- IUSS-ISRIC-FAO, 2006 – World reference base for soil resources 2006. *World Soil Resources Reports* No. 103. FAO, Rome. 145pp. (<ftp://ftp.fao.org/agl/agll/docs/wsr103e.pdf>)
- Keeney, D.R. & Sahrawat, K.L. 1986 – Nitrogen transformations in flooded rice soils. *Fertilizer Research* 9: 15-38.
- Kende, H. Knaap, E. & Cho, H. 1998 - Deepwater Rice: A Model Plant to Study Stem Elongation. *Plant Physiology* 118: 1105–1110.

- Krishnan, P.; Ramakrishnan, B.; Reddy, K.R. & Reddy, V.R. 2011 – High-Temperature Effects on Rice Growth, Yield, and Grain Quality. *In: Sparks, D. (ed.) Advances in Agronomy* vol. 111, Academic Press, pp. 87-206.
- Kush, G.S. 1997 – Origin, dispersal, cultivation and variation of rice. *Plant Molecular Biology* 35: 25-34.
- Ladha, J.K.; Pathak, H.; Krupnik, T.; Six, J. & Kessel, C. 2005 – Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: retrospect and prospects. *In: Sparks, D. (ed.) Advances in Agronomy* Vol. 87, Academic Press, pp.85-156.
- Lægread, M.; Bøckman, O.C. & Kaarstad, O. 1999 – *Agriculture, Fertilizers and the Environment*. CABI Publishing, Cambridge, 294.
- Le Mer, J. & Roger, P. 2001 - Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review. *European Journal of Soil Biology* 37: 25–50.
- Leung, H. & An, G., 2004 – Rice functional genomics: Large-scale gene discovery and applications to crop improvement. *In: Sparks, D.(ed.) Advances in Agronomy*, vol. 82. Academic Press, pp. 55-111.
- Londo, J.P.; Chiang, Y.; Hung, K.; Chiang, T. & Schaal, B.A. 2006 – Phylogeography of asian wild rice, *Oryza rufipogon*, reveals multiple independent domestications of cultivated rice, *Oryza sativa*. *PNAS* Vol. 103, n.º 25.
- LQARS (Laboratório Químico Agrícola Rebelo da Silva) 1977 – Sector de Fertilidade do Solo: Documentação 2. DGSA, Série Divulgação, Lisboa, 39pp.
- Maclean, J.L.; Dawe, D.; Hardy, B. & Hettel, G.P. 2002 – *Rice Almanac: Source Book for the Most Important Economic Activity on Earth*. Third edition. CABI Publishing, Wallingford; International Rice Research Institute, Philippines; International Center for Tropical Agriculture, Colombia; West Africa Rice Development Association, Côte d'Ivoire; Food and Agriculture Organization of the United Nations, Italy, 253pp.
- Mae, T. 1997 – Physiological nitrogen efficiency in rice: Nitrogen utilization, photosynthesis, and yield potential. *Plant and Soil* 196: 201-210.
- McNeill A. & Unkovich, M. 2007 – The nitrogen cycle in terrestrial ecosystems. *In: Marschner, P. & Rengel, Z. (Eds.) Nutrient Cycling in Terrestrial Ecosystems*. Springer, pp. 37–64.
- Mengel, K. & Kirkby, E.A. 2001. *Principles of Plant Nutrition*. Kluwer Academic Publishers. 849 pp.
- Mikkelsen, D.K. 1987 – Nitrogen budgets in flooded soils used for rice production. *Plant and Soil* 100: 71-97.
- Mikkelsen, D.S.; Jayaweera, G.R. & Rolston, D.E. 1995 – Nitrogen fertilization practices of lowland rice culture. *In: Nitrogen Fertilization in the Environment*. Marcel Dekker, Inc., New York, pp. 171-223.
- Mohanty, S. 2010 – Global rice trade: What does it mean for future food security? International Rice Research Institute (IRRI). <http://beta.irri.org/news/index.php/rice-today/global-rice-trade-what-does-it-mean-for-future-food-security.html> consultado a 19 de março 2011.
- Monteiro, P. 2011 – A indústria do arroz em Portugal. *In: ANIA (Eds.) AOP- 2.º Encontro da Orizicultura Portuguesa*, Alcácer do Sal, 32 pp.
- Negrão, S.; Oliveira, M.; Jena, K. & Mackill, D. 2008 – Integration of genomic tools to assist breeding in the japonica subspecies of rice. *Mol Breeding*, 22:159–168.

- Neue, H. 1993 – Methane emissions from rice fields. Wetland rice fields may make a major contribution to global warming. *BioScience* 41: 466-474.
- ORIVÁRZEA (Orizicultores da Várzea de Samora e Benavente) 2006 - *Caderno de Especificações Arroz Carolino das Lezírias Ribatejanas*. Salvaterra de Magos. 79 pp.
- Paine, J.A.; Shipton, C.A.; Chaggar, S.; Howells, R.M.; Kennedy, M.J.; Vernon, G.; Wright, S.Y.; Hinchliffe, E.; Adams, J.L.; Silverstone, A.L. & Drake, R. 2005 – Improving the nutritional value of Golden Rice through increase provitamin A content. *Nature Biotechnology* 23: 482-487.
- Pandey, S.; Byerlee, D.; Dawe, D.; Dobermann, A.; Mohanty, S.; Rozelle, S. & Hardy, B. 2010 - Rice in the Global Economy: Strategic Research and Policy Issues for Food Security. IRRI. [http://books.irri.org/9789712202582\\_content.pdf](http://books.irri.org/9789712202582_content.pdf)
- Pereira, L.A. 1989 – *Gestão da Rega do Arroz*. Tese de Doutoramento. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior de Agronomia, Lisboa. 201pp.
- Ponnamperuma, F.N. 1972 – The chemistry of submerged soils. *Advances in Agronomy* 24: 29-96.
- Portero, M.A. 2001 – *Cultivo del Arroz en el Sur de España*. Caja de Ahorros El Monte, Lince Artes Gráficas, Sevilla, 189 pp.
- Prihar, S.S.; Ghildyal, B.P.; Painuli, D.K. & Sur, H.S. 1985 – Physical properties of mineral soils affecting rice-based cropping systems. *In: IRRI, Soil Physics and Rice*. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines, pp. 57-70.
- Reddy, K.R. & Patrick, W.H. 1986 - Denitrification losses in flooded rice fields. *Fertilizer Research* 9: 99-116.
- Reddy, K.R.; Patrick, W.H. & Phillips, R.E. 1980 – Evaluation of selected processes controlling nitrogen loss in a flooded soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 1241-1246.
- Robert, M. & Tesier, D. 1974 – Méthode de preparation des argiles des sols pour des etudes minéralogiques. *Ann. Agron.* 25: 859-882.
- Roberts, T.L. 2008 - Improving Nutrient Use Efficiency. *Turkish Journal of Agricultural Forestry*, 32:177-182.
- Roger, P. 1997 – Rice field cyanobacteria: ecology, contribution to soil fertility and practical utilization. *In: Morot-Gaudry, J. F. (ed.) Nitrogen Assimilation by Plants; Physiological, Biochemical and Molecular Aspects*. Science Publishers, Enfield, NH, pp199–226.
- Roy, R.N.; Flink, A.; Blair, G.J. & Tandon, H.L.S. 2006 – *Plant Nutrition for Food Security. A Guide for Integrated Nutrition Management*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy 348pp.
- Sahrawat, K.L. 2010 - Nitrogen mineralization in lowland rice soils: The role of organic matter quantity and quality. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 56: 337-353.
- Saito, M.; Miyata, A.; Nagai, H. & Yamada, T. 2005 - Seasonal variation of carbon dioxide exchange in rice paddy field in Japan. *Agricultural and Forest Meteorology* 135: 93–109.
- Schneiders, M. & Scherer, H.W. 1998 - Fixation and release of ammonium in flooded rice soils as affected by redox potential. *European Journal of Agronomy* 8: 181-189.
- Sharma, P.K. & De Datta, S.K 1985 – Effects of puddling on soil physical properties and processes *In: IRRI, Soil Physics and Rice*. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines, pp. 217-234.

- Smil, V. 1999 – Nitrogen in crop production: an account of global flows. *Global Biogeochemical Cycles* 13: 647–662.
- Stanford, G. & Smith, S.J. 1972 – Nitrogen mineralization potentials of soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 36: 465–472.
- Sweeney, M. & McCouch, S. 2007 – The complex history of the domestication of rice. *Annals of Botany* 100: 951–957.
- Tabuchi, M; Abiko, T. & Yamaya, T. 2007 – Assimilation of ammonium ions and reutilization of nitrogen in rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Experimental Botany*: 58, 2319–2327.
- Taiz, L. & Zeiger, E. 2002 - *Plant Physiology* 3ed. Sinauer Associates, Sunderland. 690pp.
- Tanji, K.K. & Kielen, N.C. 2002 - *Agricultural Drainage Water Management in Arid and Semi-Arid Areas*. FAO Irrigation and Drainage Paper 61. 188pp.
- UNICEF (United Nations Children's Fund) 2004 – A carência de vitaminas e minerais compromete o desenvolvimento de um terço da população mundial. [http://www.unicef.pt/docs/pdf/04-03-22\\_carencia\\_vitamina\\_a\\_no\\_mundo.pdf](http://www.unicef.pt/docs/pdf/04-03-22_carencia_vitamina_a_no_mundo.pdf)
- Vasconcelos, M.; Datta, K.; Oliva, N.; Khalekuzzaman, M.; Torrizo, L.; Krishnan, S.; Oliveira, M.; Goto, F. & Datta, S.K. 2003 – Enhanced iron and zinc accumulation in transgenic rice with the ferritin gene. *Plant Science* 164: 371-378.
- Vaughan, D.A.; Lu, B. & Tomooka, N. 2008 – The evolving story of rice evolution. *Plant Science* 174: 394–408.
- Vitousek, P.M; Aber, J.D.; Howarth, R.W.; Likens, G.E.; Matson, P.A.; Schindler, D.W.; Schlesinger, W.H. & Tilman, D.G. 1997 - Human Alteration of the Global Nitrogen Cycle: Causes and Consequences. *Ecological Applications* 7:737-750.
- Wassmann, R. & Aulakh, M.S. 2000 - The role of rice plants in regulating mechanisms of methane emissions. *Biology and Fertility of Soils* 31: 20-29.
- Wassmann, R. & Dobermann, A. 2006 - Greenhouse Gas Emissions from Rice Fields: What Do we Know and Where Should we Head for? *In: The 2nd Joint International Conference on "Sustainable Energy and Environment (SEE 2006)". 21-23 November 2006, Bangkok, Thailand.*
- Watanabe, A.; Katoh, K. & Kimura, M. 1993 – Effect of rice straw application on CH<sub>4</sub> emission from paddy fields. *Soil Science and Plant Nutrition* 39: 707-712.
- White, J.R. & Reddy, K.R. 2001 – Influence of selected inorganic electron acceptors on organic nitrogen mineralization in Everglades soils. *Soil Science Society of America Journal* 65: 941-948.
- Yan, X., Shi, S.L. & Xing, G. 2000 – Pathways of N<sub>2</sub>O emission from rice paddy soil. *Soil Biology and Biochemistry* 32: 437–440.
- Yan, X.Y.; Yagi, K.; Akiyama, H. & Akimoto, H. 2005. Statistical analysis of the major variables controlling methane emission from rice fields. *Global Change Biology* 11: 1131-1141
- Yoshida, S & Hasegawa, S. 1982 – The rice root system: its development and function. *In: IRRRI (ed.) Drought Resistance in Crops With Emphasis on Rice*. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines, pp. 97 – 114.
- Yoshida, S. 1981 – *Fundamentals of Rice Crop Science*. The International Rice Research Institute. Los Baños, Philippines.

Yu, J.; Hu, S. ; Wang, J.; Wong, G.K.; Li, S.; Liu, B.; Deng, Y.; Dai, L.; Zhou, Y.; Zhang, X.; Cao, M.; Liu, J.; Sun, J.; Tang, J.; Chen, Y.; Huang, X.; Lin, W.; Ye, C.; Tong, W.; Cong, L.; Geng, J.; Han, Y.; Li, L.; Li, W.; Hu, G.; Huang, X.; Li, W.; Li, J.; Liu, Z.; Li, L.; Liu, J.; Qi, Q.; Liu, J.; Li, L.; Li, T.; Wang, X.; Lu, H.; Wu, T.; Zhu, M.; Ni, P.; Han, H.; Dong, W.; Ren, X.; Feng, X.; Cui, P.; Li, X.; Wang, H.; Xu, X.; Zhai, W.; Xu, Z.; Zhang, J.; He, S.; Zhang, J.; Xu, J.; Zhang, K.; Zheng, X.; Dong, J.; Zeng, W.; Tao, L.; Ye, J.; Tan, J.; Ren, X.; Chen, X.; He, J.; Liu, D.; Tian, W.; Tian, C.; Xia, H.; Bao, Q.; Li, G.; Gao, H.; Cao, T.; Wang, J.; Zhao, W.; Li, P.; Chen, W.; Wang, X.; Zhang, W.; Hu, J.; Wang, J.; Liu, S.; Yang, J.; Zhang, G.; Xiong, Y.; Li, Z.; Mao, L.; Zhou, C.; Zhu, Z.; Chen, R.; Hao, B.; Zheng, W.; Chen, S.; Guo, W.; Li, G.; Liu, S.; Tao, M.; Wang, J.; Zhu, L.; Yuan, L.; & Yang, H. 2002 – A draft sequence of the rice genome (*Oryza sativa* L. ssp. *Indica*). *Science* 296: 79-92.