



Universidade do Porto
Faculdade de Engenharia

FEUP



Manuel José Esteves de Brito

Análise do Regime Hídrico com Tecnologia Web e Sistemas de Informação Geográfica

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Resumo

Este trabalho tem como principal objectivo a planificação e disponibilização, através das novas tecnologias de informação e comunicação, nomeadamente a Internet, de uma base de dados que permita a integração de informações Web e de bases de dados, bem como a disponibilização de informações geográficas, permitindo um acesso ao conhecimento de forma mais fácil e rápida.

Análise do Regime Hídrico com Tecnologia Web e Sistemas de Informação Geográfica

Manuel José Esteves de Brito

Dissertação submetida para satisfação parcial dos resultados do grau
de Mestre em Tecnologia Multimédia

Dissertação realizada sob orientação

Professor António Augusto de Sousa

Eng.º José Miguel Losa

PORTO, JANEIRO DE 2004

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Análise do Regime Hídrico com Tecnologias Web e Sistemas de Informação Geográfica

Manuel José Esteves de Brito

UNIVERSIDADE DO PORTO	
Faculdade de Engenharia	
BIBLIOTECA M	
N.º	<u>79712</u>
CDU	<u>004(043)</u>
Data	<u>14.5.2004</u>

Dissertação realizada sob orientação

Professor António Augusto de Gouveia

Eng.º José Miguel Lous

PORTO, Janeiro de 2004

Resumo

Este trabalho tem como principal objectivo a criação e disponibilização, através das novas tecnologias de informação e comunicação, nomeadamente a Internet, de um local, que recorrendo à integração de tecnologias Web e de bases de dados, bem como aos sistemas de informação geográfica, pretende ser um serviço de apoio à gestão da rega da vinha para a região do Dão.

Numa primeira parte começamos por fazer uma introdução aos Sistemas de Informação Geográfica (GIS), salientando-se as suas principais funções e a discussão da sua relevância para apoio a tomadas de decisão espaciais. Segue-se a apresentação do método de cálculo dos consumos em água de rega implementado, onde após introdução aos modelos de simulação do balanço hídrico do solo, é analisada a equação do balanço de água no solo e todos os seus componentes. No final desta primeira parte, dedicamos um capítulo à inferência espacial, apresentando os principais modelos de estimação (modelos deterministas e geoestatísticos).

Nos dois capítulos seguintes, são apresentadas e descritas as principais etapas que o projecto atravessou. O processo de recolha, armazenamento e organização dos dados, análise da homogeneidade das séries de dados e inferência espacial são abordados no capítulo 4 e os aspectos relativos ao desenvolvimento do protótipo de um local Web, no capítulo seguinte.

Por fim, apresentam-se as conclusões gerais, assim como algumas linhas de desenvolvimento futuro.

Abstract

This study, have as main objective the creation and availability, through new information technology and communication, namely the Internet, via a site, by resorting to the integration of web and data bases technologies, as well as Geographical Information Systems (GIS), with the objective of providing an aid management service for irrigation of vines for the Dão region.

Firstly we start off by introducing the Geographical Information Systems (GIS) pointing out its main functions and a discussion of its relevance for spatial decision making. Followed by presentation of the method of calculating water consumption of the irrigation implemented, where after the introduction of the water balance simulation models in soil, the water balance in soil equation is analysed and all of its components. At the end of this first part we will dedicate a chapter to spatial inference, presenting the main estimation models (deterministic and geostatistics models).

On the follow two chapters, will be presented and described the principals stages of the project. The recovery storage, data organization, analysis of the homogeneity of data series and spatial inference are approached in the chapter 4. In the next chapter is exposed the prototype development from a web site.

Finally, we will present the general conclusions as well as the presentation of some future development perspective.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, não posso deixar de fazer uma referência muito especial ao Professor Augusto Sousa e ao Eng.º Miguel Losa pela forma interessada e dedicada como orientaram, desde o início, a realização deste trabalho, assim como pelo incentivo e paciência demonstrada nos momentos mais difíceis.

Agradeço ao Eng.º Pedro Rodrigues, da Escola Superior Agrária de Viseu, pela disponibilidade e colaboração.

À minha Mulher, Mãe e Irmão, pelo amor, carinho e apoio que sempre manifestaram. Só com a sua compreensão e paciência tornaram possível, nos momentos de desânimo, ganhar força para conseguir terminar.

Índice geral

Resumo	8
Agradecimentos	10
Apresentação	12
Índice geral	14
Índice de figuras	16
Índice de tabelas	18
1. Introdução	20
1.1. Apresentação do trabalho	21
1.2. Objetivos do trabalho	22
2. Sistemas de Informação Geográfica (SIG)	24
2.1. Definição de um SIG	25
2.2. Componentes de um SIG	26
2.3. Aplicações práticas de um SIG	27
2.4. Tipos de dados	28
2.5. Estrutura de dados e organização de dados	29
2.6. Tipos de dados de entrada	30
2.7. Tipos de saída	31
2.8. Tipos de dados de saída	32
2.9. Tipos de dados de saída	33
3. Caracterização física da área	35
3.1. Localização da área de estudo	36
3.2. Caracterização física da área	37
3.3. Caracterização da rede hidrográfica da área	38
3.4. Caracterização da rede hidrográfica da área	39
3.5. Caracterização da rede hidrográfica da área	40
3.6. Caracterização da rede hidrográfica da área	41
3.7. Caracterização da rede hidrográfica da área	42
3.8. Caracterização da rede hidrográfica da área	43
3.9. Caracterização da rede hidrográfica da área	44
3.10. Caracterização da rede hidrográfica da área	45
3.11. Caracterização da rede hidrográfica da área	46
3.12. Caracterização da rede hidrográfica da área	47
3.13. Caracterização da rede hidrográfica da área	48
3.14. Caracterização da rede hidrográfica da área	49
3.15. Caracterização da rede hidrográfica da área	50
3.16. Caracterização da rede hidrográfica da área	51
3.17. Caracterização da rede hidrográfica da área	52
3.18. Caracterização da rede hidrográfica da área	53
3.19. Caracterização da rede hidrográfica da área	54
3.20. Caracterização da rede hidrográfica da área	55
3.21. Caracterização da rede hidrográfica da área	56
3.22. Caracterização da rede hidrográfica da área	57
3.23. Caracterização da rede hidrográfica da área	58
3.24. Caracterização da rede hidrográfica da área	59
3.25. Caracterização da rede hidrográfica da área	60
3.26. Caracterização da rede hidrográfica da área	61
3.27. Caracterização da rede hidrográfica da área	62
3.28. Caracterização da rede hidrográfica da área	63
3.29. Caracterização da rede hidrográfica da área	64
3.30. Caracterização da rede hidrográfica da área	65
3.31. Caracterização da rede hidrográfica da área	66
3.32. Caracterização da rede hidrográfica da área	67
3.33. Caracterização da rede hidrográfica da área	68
3.34. Caracterização da rede hidrográfica da área	69
3.35. Caracterização da rede hidrográfica da área	70
3.36. Caracterização da rede hidrográfica da área	71
3.37. Caracterização da rede hidrográfica da área	72
3.38. Caracterização da rede hidrográfica da área	73
3.39. Caracterização da rede hidrográfica da área	74
3.40. Caracterização da rede hidrográfica da área	75
3.41. Caracterização da rede hidrográfica da área	76
3.42. Caracterização da rede hidrográfica da área	77
3.43. Caracterização da rede hidrográfica da área	78
3.44. Caracterização da rede hidrográfica da área	79
3.45. Caracterização da rede hidrográfica da área	80
3.46. Caracterização da rede hidrográfica da área	81
3.47. Caracterização da rede hidrográfica da área	82
3.48. Caracterização da rede hidrográfica da área	83
3.49. Caracterização da rede hidrográfica da área	84
3.50. Caracterização da rede hidrográfica da área	85
3.51. Caracterização da rede hidrográfica da área	86
3.52. Caracterização da rede hidrográfica da área	87
3.53. Caracterização da rede hidrográfica da área	88
3.54. Caracterização da rede hidrográfica da área	89
3.55. Caracterização da rede hidrográfica da área	90
3.56. Caracterização da rede hidrográfica da área	91
3.57. Caracterização da rede hidrográfica da área	92
3.58. Caracterização da rede hidrográfica da área	93
3.59. Caracterização da rede hidrográfica da área	94
3.60. Caracterização da rede hidrográfica da área	95
3.61. Caracterização da rede hidrográfica da área	96
3.62. Caracterização da rede hidrográfica da área	97
3.63. Caracterização da rede hidrográfica da área	98
3.64. Caracterização da rede hidrográfica da área	99
3.65. Caracterização da rede hidrográfica da área	100
3.66. Caracterização da rede hidrográfica da área	101
3.67. Caracterização da rede hidrográfica da área	102
3.68. Caracterização da rede hidrográfica da área	103
3.69. Caracterização da rede hidrográfica da área	104
3.70. Caracterização da rede hidrográfica da área	105
3.71. Caracterização da rede hidrográfica da área	106
3.72. Caracterização da rede hidrográfica da área	107
3.73. Caracterização da rede hidrográfica da área	108
3.74. Caracterização da rede hidrográfica da área	109
3.75. Caracterização da rede hidrográfica da área	110
3.76. Caracterização da rede hidrográfica da área	111
3.77. Caracterização da rede hidrográfica da área	112
3.78. Caracterização da rede hidrográfica da área	113
3.79. Caracterização da rede hidrográfica da área	114
3.80. Caracterização da rede hidrográfica da área	115
3.81. Caracterização da rede hidrográfica da área	116
3.82. Caracterização da rede hidrográfica da área	117
3.83. Caracterização da rede hidrográfica da área	118
3.84. Caracterização da rede hidrográfica da área	119
3.85. Caracterização da rede hidrográfica da área	120
3.86. Caracterização da rede hidrográfica da área	121
3.87. Caracterização da rede hidrográfica da área	122
3.88. Caracterização da rede hidrográfica da área	123
3.89. Caracterização da rede hidrográfica da área	124
3.90. Caracterização da rede hidrográfica da área	125
3.91. Caracterização da rede hidrográfica da área	126
3.92. Caracterização da rede hidrográfica da área	127
3.93. Caracterização da rede hidrográfica da área	128
3.94. Caracterização da rede hidrográfica da área	129
3.95. Caracterização da rede hidrográfica da área	130
3.96. Caracterização da rede hidrográfica da área	131
3.97. Caracterização da rede hidrográfica da área	132
3.98. Caracterização da rede hidrográfica da área	133
3.99. Caracterização da rede hidrográfica da área	134
3.100. Caracterização da rede hidrográfica da área	135

Índice geral

Resumo.....	ii
Abstract.....	iii
Agradecimentos	iv
Índice geral.....	vi
Índice de figuras	viii
Índice de tabelas	x
1. Introdução.....	1
1.1. Apresentação do problema	2
1.2. Estrutura do trabalho	4
2. Sistemas de Informação Geográfica (GIS).....	5
2.1. Definição de um GIS	6
2.2. Componentes de um GIS	7
2.3. Características funcionais de um GIS.....	8
2.3.1. Entrada de dados	8
2.3.2. Armazenamento e organização de dados.....	11
2.3.3. Manipulação e análise de dados.....	17
2.3.4. Saída de dados	32
2.4. Algumas limitações dos SIG's	32
2.5. Sumário	34
3. Consumos em água de rega.....	35
3.1. Balanço de água no solo	36
3.1.1. Equação geral do balanço	36
3.1.2. Componentes do balanço hídrico do solo	38
3.1.3. Equações simplificadas do balanço de água no solo	42
3.1.4. Aplicabilidade ao Cálculo de Necessidades de Rega.....	44
3.2. Precipitação efectiva	44
3.2.1. Aplicabilidade ao Cálculo de Necessidades de Rega.....	45
3.3. Evapotranspiração cultural	46
3.3.1. Aproximação simples - Coeficientes culturais	48
3.3.2. Evapotranspiração cultural em condições de stresse hídrico	50
3.3.3. Aplicabilidade ao Cálculo de Necessidades de Rega.....	52
3.4. Evapotranspiração de referência.....	53
3.4.1. Equação FAO Penman-Monteith	53
3.4.2. Dados Meteorológicos.....	54
3.5. Sumário	62

4. Inferência espacial	63
4.1. Modelos deterministas	64
4.1.1. Método dos polígonos de influência	64
4.1.2. Método de triangulação	65
4.1.3. Método do inverso da potência das distâncias	65
4.2. Modelos geoestatísticos	66
4.2.1. Variáveis regionalizadas	67
4.2.2. Hipóteses restritivas	68
4.2.3. Análise da continuidade espacial	71
4.2.4. Estimção geoestatística: Krigagem	77
4.3. Sumário	81
5. Armazenamento e tratamento de dados	83
5.1. Recolha de informação	84
5.2. Armazenamento e organização dos dados	86
5.2.1. Dados cartográficos	86
5.2.2. Dados alfanuméricos	87
5.3. Análise da homogeneidade das séries de dados	90
5.4. Inferência espacial	97
5.4.1. Análise da continuidade espacial	97
5.4.2. Precipitação total	102
5.4.3. Estimção	103
5.5. Sumário	105
5. Armazenamento e tratamento de dados	83
5.1. Recolha de informação	84
5.2. Armazenamento e organização dos dados	86
5.2.1. Dados cartográficos	86
5.2.2. Dados alfanuméricos	87
Modelo conceptual	88
Modelo relacional	90
5.3. Análise da homogeneidade das séries de dados	90
5.4. Inferência espacial	97
5.4.1. Análise da continuidade espacial	97
5.4.2. Precipitação total	102
5.4.3. Estimção	103
5.5. Sumário	105
6. Local Web - GISDao	106
6.1. Arquitectura do protótipo	106
6.2. Autodesk MapGuide	107
6.2.1. Componentes de visualização de mapas	108
6.2.2. Comonentes do servidor de mapas	108
6.2.3. Aplicações Autodesk MapGuide	110
6.3. Aplicação Web	114

7. Conclusões e desenvolvimentos futuros 119

Índice de figuras

Capítulo 2

Figura 2.1 - Diagrama conceitual de um SSI	2
Figura 2.2 - Tipos de SSI	12
Figura 2.3 - Diagrama conceitual de integração entre SSI	15
Figura 2.4 - Diagrama conceitual de integração entre SSI	21
Figura 2.5 - Diagrama conceitual de SSI	24
Figura 2.6 - Diagrama conceitual de SSI	24
Figura 2.7 - Diagrama conceitual de SSI	25

Capítulo 3

Figura 3.1 - Diagrama conceitual de SSI	37
Figura 3.2 - Diagrama conceitual de SSI	41
Figura 3.3 - Diagrama conceitual de SSI	45
Figura 3.4 - Diagrama conceitual de SSI	52

Capítulo 4

Figura 4.1 - Diagrama conceitual de SSI	65
Figura 4.2 - Diagrama conceitual de SSI	74

Capítulo 5

Figura 5.1 - Diagrama conceitual de SSI	89
Figura 5.2 - Diagrama conceitual de SSI	97
Figura 5.3 - Diagrama conceitual de SSI	99
Figura 5.4 - Diagrama conceitual de SSI	99
Figura 5.5 - Diagrama conceitual de SSI	103
Figura 5.6 - Diagrama conceitual de SSI	105
Figura 5.7 - Diagrama conceitual de SSI	105
Figura 5.8 - Diagrama conceitual de SSI	104
Figura 5.9 - Diagrama conceitual de SSI	105

Índice de figuras

Capítulo 2

Figura 2.1 - Diagrama conceptual de um GIS.	7
Figura 2.2 - Relações espaciais.	12
Figura 2.3 - Exemplo da operação de comparação maior ou igual.	19
Figura 2.4 - Exemplo de preprocessamento para <i>layers</i> de polígonos.	21
Figura 2.5 - Exemplo da operação <i>fuzzy</i> MIN.	23
Figura 2.6 - Operação de propagação: cálculo da distância.	24
Figura 2.7 - Exemplo da operação de pesquisa soma.	26

Capítulo 3

Figura 3.1 - Balanço de água no solo (FAO, 2000).	37
Figura 3.2 - Factores que afectam a evapotranspiração (FAO, 2000).	41
Figura 3.3 - Curva de coeficientes culturais (FAO, 2000).	48
Figura 3.4 - Coeficiente stresse hídrico (FAO, 2000).	52

Capítulo 4

Figura 4.1 - Componentes de uma variável regionalizada.	68
Figura 4.2 - Parâmetros do semivariograma.	74

Capítulo 5

Figura 5.1 - Cartografia digital dos limites administrativos das freguesias.	86
Figura 5.2 - <i>Layer</i> correspondente à malha gerada.	87
Figura 5.3 - Diagrama do modelo conceptual E-R.	89
Figura 5.4 - Diagrama de relações da base de dados Microsoft Access.	90
Figura 5.5 - Gráfico dos resíduos cumulativos associado a uma elipse para probabilidade de 80%	95
Figura 5.6 - Gráfico dos resíduos cumulativos associado a uma elipse de probabilidade de 80%, depois de corrigida a variável <i>y</i> .	95
Figura 5.7 - Gráficos do ajuste dos modelos teóricos para a temperatura média mensal dos máximos diários para o mês de Janeiro	99
Figura 5.8 - Extracto da tabela CONT_ESPACIAL.	104
Figura 5.9 - Extracto da tabela DADOS_POLIGONO.	105

Figura 6.1 - Arquitectura do protótipo.	106
Figura 6.2 - Modelo de objectos da API do <i>Autodesk MapGuide Viewer</i> .	112
Figura 6.3 - Janela principal da aplicação cliente.	115

Índice de tabelas

Capítulo 5

Tabela 5.1 - Estações meteorológicas e períodos de que dispomos informação climática mensal	84
Tabela 5.2 - Estações udométricas e períodos de que dispomos informação climática mensal	85
Tabela 5.3 - Valores da variação normal padrão z_p para uma dada probabilidade p	95
Tabela 5.4 Resultados do modelo teórico que melhor se ajustou para temperatura média mensal da temperatura média do dia	100
Tabela 5.5 - Resultados do modelo teórico que melhor se ajustou para Temperatura média mensal dos mínimos diários	101
Tabela 5.6 - Resultados do modelo teórico que melhor se ajustou para Temperatura média mensal dos máximos diários	101
Tabela 5.7 - Resultados do modelo teórico que melhor se ajustou para a insolação total	102
Tabela 5.8 - Resultados do modelo teórico que melhor se ajustou para a precipitação total	103

1.3. Apresentação do problema

1. Introdução

Os recursos naturais são vulgarmente manipulados sem o correcto conhecimento de como se comportam no meio ambiente, não sendo por isso de estranhar os resultados inesperados e por vezes com consequências e impactos irreversíveis.

Contudo, para as actividades e estruturas de gestão adequadas ao desenvolvimento, controlo e preservação desses recursos, é necessário o conhecimento técnico da realidade e de formas adequadas de organização.

No entanto, em alguns sectores, a tecnologia não é totalmente dominada porque depende em muito de conhecimentos locais. Na verdade, a capacidade científica necessária, por si só, é muitas vezes insuficiente, sendo necessário também um profundo e correcto conhecimento da realidade onde se pretende agir.

Particularizando ao sector agrícola, indissociável dos fenómenos e recursos naturais, o binómio capacidade científica e conhecimento local, é imprescindível em termos de produtividade das diferentes culturas. Em Portugal, por exemplo, com as mudanças verificadas na política agrícola, cada vez mais influenciada pela política mundial de mercados, as ajudas à produção tendem rapidamente a reduzir-se, de tal forma que o rendimento dos agricultores ficará cada vez mais dependente da produção agrícola. Isto é, numa óptica de comércio livre, a concorrência, nomeadamente entre as diversas regiões, será cada vez maior.

Pelo exposto, e face à crescente utilização da tecnologia na sociedade actual, o desenvolvimento e a disponibilização de ferramentas que integrem, não só o conhecimento científico numa determinada área, mas também um amplo conhecimento da realidade onde se inserem, são cada vez mais necessárias, principalmente nos sectores em que não é possível dissociar essas duas componentes para o alcance dos objectivos.

1.1. Apresentação do problema

Pretendendo-se que a organização, manipulação e análise da informação subjacente ao planeamento de recursos naturais e à produção agrícola proporcione respostas concretas a problemas específicos, os Sistemas de Informação Geográfica são uma ferramenta tecnológica fundamental e indispensável ao desenvolvimento de sistemas espaciais. Assim, as motivações apresentadas anteriormente justificam a tentativa que é proposta, de utilização dos Sistemas de Informação Geográfica para visualização de fenómenos naturais, assim como disponibilizar uma ferramenta útil às tomadas de decisão de forma a ajudar a resolver problemas de disponibilidade de água no âmbito da cultura da vinha.

A videira (*vitis vinifera*) é considerada uma planta de regiões temperadas mas que se adapta às mais variadas condições climáticas. Hoje em dia, constitui uma cultura espalhada por quase todo o mundo, estando o seu crescimento profundamente condicionado pela disponibilidade de água. A sua produtividade é altamente dependente da oferta pluviométrica, bem como da frequência e intensidade dos períodos secos durante a estação chuvosa.

Assim, com a finalidade de aumentar e estabilizar a produção, o recurso à rega da vinha tem vindo a aumentar bastante na última década em muitas regiões vitivinícolas, especialmente em regiões áridas e semi-áridas. No entanto, contrariamente à rega da vinha para uva de mesa, na qual a água é fornecida de modo a obter-se o máximo de produção, a rega da vinha para vinho é habitualmente conduzida por forma a que a planta seja submetida a um défice hídrico controlado, o que condiciona o vigor vegetativo, o desenvolvimento do fruto e, consequentemente, promove a qualidade do vinho.

Por conseguinte, o estudo da resposta da videira à disponibilidade de água adquire maior relevância no caso da produção de uva para vinho, onde a qualidade está muito dependente da composição do fruto. Assim, uma correcta gestão da disponibilidade de água no solo deverá obrigatoriamente permitir obter um compromisso entre a produtividade e a qualidade, sendo para tal muitas vezes necessário recorrer a processos artificiais de modo a

satisfazer as necessidades em água das plantas quando esta não existe no solo em condições utilizáveis.

Com este trabalho pretende-se, recorrendo à integração de Tecnologias Web e de Bases de Dados, bem como aos Sistemas de Informação Geográfica, para a Região Demarcada do Dão, desenvolver um protótipo de um local Web. Para uma série histórica de dados meteorológicos mensais das estações climatológicas da região e sua envolvente, o sistema deve permitir mapear mensalmente a distribuição espacial e temporal de cada um dos elementos climáticos e, com base na análise do balanço hídrico do solo, determinar e mapear a quantidade de água que deve ser colocada pela rega para satisfação das necessidades hídricas da cultura da vinha. Além disso, com base nos registos horários das estações, o sistema deve ainda permitir determinar, *on-line* e em tempo real, a reserva de água no solo ao longo do ciclo vegetativo da cultura da videira, mediante especificação da localização da cultura, bem como a data de início do ciclo vegetativo e, tipo e espessura de solo.

A gestão sustentável dos recursos de água requer métodos de análise, planeamento e controlo que permitam a incorporação de um grande número de variáveis espaciais e temporais, nomeadamente meteorológicas e agronómicas, nem sempre de fácil quantificação muito devido à inexistência de instrumentação adequada facilmente disponível mas também por desconhecimento da sua variabilidade espacial e temporal.

Neste sentido, com o objectivo de analisar e mapear a variabilidade espacial dessas variáveis, devido às suas características, os Sistemas de Informação Geográfica (GIS) são sem dúvida uma ferramenta de grande utilidade. Contudo, apesar dos suportes lógicos existentes no mercado disponibilizarem métodos para mapear a variabilidade de um atributo, nem todos os modelos inferenciais propostos respondem a questões relacionadas com a forma, tamanho e orientação do domínio a ser considerado na interpolação e tão pouco fornecem informações a respeito da incerteza associada aos valores estimados. Na verdade, a estatística convencional aplicável a dados espaciais é suportada por muitos GIS, mas, infelizmente, as técnicas de geoestatística apenas estão disponíveis em sistemas especialmente desenvolvidos ou que integrem *software* geoestatístico. Por conseguinte, a inferência de valores a partir de dados observados em diferentes localizações e de acordo com a variação sistemática do fenómeno é um processo não automatizado por um GIS, envolvendo normalmente a integração de sistemas *stand-alone* de geoestatística existentes ou desenvolvidos para o efeito.

Durante anos, têm vindo a considerar-se as tomadas de decisão como uma arte - um talento conferido à nascença e/ou adquirido através de um longo período de experiência

(onde os erros fazem parte da 'formação'). No entanto, segundo Turban (1995), actualmente é mais difícil tomar decisões porque o número de alternativas disponíveis é muito superior ao que foi no passado e o custo de cometer erros pode ser muito elevado.

Espera-se assim que, com o estudo e conhecimento local das variáveis envolvidas no modelo científico de simulação do balanço hídrico do solo, se contribua com uma ferramenta que de alguma forma ajude nas tomadas de decisão inerentes à gestão dos recursos hídricos da cultura da vinha na Região Demarcada do Vinho do Dão.

1.2. Estrutura do trabalho

Com o propósito de abordar os vários aspectos do problema apresentado, o trabalho que se apresenta estrutura-se em três partes fundamentais.

A primeira parte inicia-se com um capítulo relativo aos Sistemas de Informação Geográfica (GIS), onde são abordados vários aspectos relevantes para uma melhor compreensão das suas potencialidades e modo de funcionamento, salientando-se as suas principais funções e a discussão da sua importância para apoio a tomadas de decisão espaciais. Segue-se um capítulo com a apresentação do método de cálculo dos consumos em água de rega implementado, recomendado e publicado pela *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO), no seu PAPER 56 - *Irrigation and drainage*. Neste capítulo, após uma breve introdução aos modelos de simulação do balanço hídrico do solo, é analisada a equação do balanço de água no solo e todos os seus componentes. No final desta primeira parte, dada a sua importância para o trabalho, dedicamos um capítulo à inferência espacial, onde se apresentam os principais métodos de interpolação de valores numa superfície contínua. Inicia-se com alguns dos métodos deterministas mais usuais e grande aplicação na cartografia de fenómenos espaciais e, posteriormente, são apresentados os modelos geoestatísticos, relevando-se a análise da continuidade espacial e a estimação geoestatística, vulgarmente designada por Krigagem.

Nos dois capítulos seguintes, são apresentadas e descritas as principais etapas que o projecto atravessou. O processo de recolha, armazenamento e organização dos dados, análise da homogeneidade das séries de dados e inferência espacial são abordados no capítulo 4 e os aspectos relativos ao desenvolvimento do protótipo de um local Web, no capítulo seguinte.

Por fim, apresentam-se as conclusões gerais, assim como algumas linhas de desenvolvimento futuro.

2.1. Definição de um GIS

A maioria das definições de GIS convergem-se em dois aspectos de natureza tecnológica: a utilização de computadores, de aplicações baseadas em dados e a criação de uma base de dados geográficos, para análise, armazenamento e visualização dos dados geográficos (Muller et al., 1994).

Todavia, para se argumentar que a funcionalidade de um GIS pode desempenhar um papel crucial na tomada de decisão de uma decisão, de acordo com Frazier e Lynch (1994), relacionar a funcionalidade de um GIS, só a destacar três aspectos importantes.

2. Sistemas de Informação Geográfica (GIS)

Actualmente a informação é encarada como um dos recursos mais importantes contribuindo decisivamente em termos de capacidade de decisão.

Hoje, mais do que nunca, as tomadas de decisão são um processo complexo dado o volume de informação em jogo, a sua complexidade e a frequência com que se altera. No entanto, para que possa ser utilizada como um apoio eficaz, a informação só tem valor se se verificarem, simultaneamente, algumas condições: actualidade, correcção, relevância, disponibilidade, e legibilidade.

Especialmente no que respeita ao planeamento de recursos naturais, vias de comunicação, produção agrícola, localização de unidades industriais, planeamento regional e urbano, entre outros, a informação não deve nem pode resumir-se a uma simples colecção de dados, mas a sua organização, manipulação e análise deve produzir respostas concretas a problemas específicos.

Neste contexto, os Sistemas de Informação Geográfica desempenham um papel fundamental, tendo vindo a revelar-se uma ferramenta tecnológica poderosa e promissora, indispensável ao desenvolvimento de sistemas espaciais que sirvam de suporte às tomadas de decisão.

Neste capítulo, serão abordados vários aspectos, ainda que alguns de forma muito genérica, relacionados com os GIS que se julgam importantes para melhor compreensão

das suas potencialidades e modo de funcionamento, dando-se particular ênfase às funções de análise e manipulação de dados.

2.1. Definição de um GIS

A maioria das definições de GIS centralizam-se em dois aspectos do sistema: tecnologia e/ou resolução de problemas. As abordagens tecnológicas definem os GIS's como um conjunto de ferramentas para entrada, armazenamento e organização, manipulação, análise, e saída de dados espaciais (Marble et al., 1984).

Todavia, pode-se argumentar que a funcionalidade de um GIS pode desempenhar um papel crucial no processo de tomada de uma decisão. De acordo com Foote e Lynch (1996a), relativamente à funcionalidade de um GIS, há a destacar três aspectos importantes.

Antes demais, um GIS deve ser considerado como uma base de dados digital em que um sistema de coordenadas espacial comum é o principal meio para armazenar e aceder a dados e informação. A capacidade de executar copiosas tarefas utilizando tanto dados cartográficos como alfanuméricos distingue os GIS de outros sistemas de gestão de informação.

Por outro lado, um GIS é uma tecnologia integrada que permite a incorporação de várias tecnologias geográficas tais como detecção remota (*Remote Sensing* - RS), sistema de posicionamento global (*Global Positioning System* - GPS), desenho assistido por computador (*Computer-Aided Design* - CAD), mapeamento automático (*Automated Mapping* - AM) e facilidades de gestão (*Facilities Management* - FM). Por sua vez, estas tecnologias geográficas podem ser integradas com técnicas de análise e de apoio às tomadas de decisão.

Por último, devido ao seu objectivo final, podemos considerar um GIS como um sistema de apoio às tomadas de decisão envolvendo a integração de dados referenciados espacialmente num ambiente de resolução de problemas (Cowen, 1988). A forma como os dados são introduzidos, armazenados e analisados num GIS reflecte como essa informação poderá ser usada numa análise específica ou em tarefas de tomadas de decisão (Foote e Lynch, 1996a). Um GIS deve ser visto como um processo e não tão-somente *software* ou *hardware*. O sistema contém um conjunto de procedimentos que facilitam a entrada, armazenamento, manipulação, análise, e saída de dados para suporte a actividades de tomadas de decisão (Grimshaw, 1994).

Tendo em consideração os aspectos comuns à maioria das definições dos diferentes autores, pode-se afirmar que um GIS, basicamente, consiste em duas ferramentas interligadas entre si: um sistema de gestão de base de dados (SGBD) e um sistema de processamento gráfico. Trata-se de um sistema particular dos sistemas de informação em que a base de dados contém, entre outros, atributos de entidades, actividades ou fenómenos susceptíveis de referenciação cartográfica que se podem definir espacialmente por pontos, linhas ou polígonos. Um GIS não faz mais do que recolher, armazenar e manipular os dados sobre estas primitivas por forma a extrair nova informação para um determinado fim.

2.2. Componentes de um GIS

Um GIS pode ser descrito como um conjunto organizado de equipamento, suportes lógicos, dados e o elemento humano, para eficientemente recolher, armazenar, actualizar, manipular, analisar e apresentar informação geograficamente referenciada (Maguire, 1991; ESRI, 1994).



Figura 2.1 - Diagrama conceptual de um GIS.

O equipamento pode ser qualquer tipo de computador, desde os pessoais até estações de trabalho sofisticadas e, adicionalmente, os periféricos de entrada de dados (por exemplo, *scanners* e mesas digitalizadoras), bem como os periféricos gráficos (por exemplo, impressoras e traçadores gráficos).

No que concerne a suportes lógicos de GIS, existem actualmente no mercado pacotes que vão desde os mais simples, desenvolvidos para computadores pessoais, até aos mais sofisticados, com uma série diversificada de comandos e funções, desenvolvidos para estações de trabalho científicas.

O terceiro elemento refere-se aos dados geográficos, nas suas componentes cartográfica e alfanumérica, um importante elemento dos GIS, sendo mesmo, em certos

casos, o elemento mais oneroso. Dado o volume de informação necessário para a resolução da maioria dos problemas geográficos, os custos referentes ao processo de recolha, armazenamento e manipulação dos dados, por vezes, chega a ultrapassar os do equipamento ou dos suportes lógicos envolvidos.

Finalmente, a componente humana diz respeito ao conjunto de pessoas responsáveis pela concepção, execução e utilização do sistema, as quais devem possuir formação adequada às funções que desempenham. Na verdade, tão importante como ter um GIS é saber operar com ele. Embora a operação de um GIS não seja muito complexa, o seu uso efectivo envolve normalmente uma organização complexa, requerendo assim tempo de aprendizagem a vários níveis, sem o qual a eficácia do sistema é drasticamente reduzida.

2.3. Características funcionais de um GIS

O avanço da tecnologia transformou os GIS's numa ferramenta útil para o desenvolvimento de aplicações em que é necessário um conhecimento local da realidade onde se pretende agir. De acordo com a definição do *Environmental Systems Research Institute* (ESRI), para além do referido na secção 2.2., um GIS completo deve dispor de funções de análise espacial, sendo estas capacidades que o diferenciam necessariamente do *software* de mapeamento.

A análise espacial em GIS envolve três tipos de operações: consulta de atributos (também designadas por consultas não espaciais), consultas espaciais e geração de novos conjuntos de dados a partir da base de dados original (Chou, 1997).

Em termos funcionais um GIS pode ser subdividido em quatro componentes principais ou subsistemas: entrada, armazenamento e organização, manipulação e análise, e saída de dados. Seguidamente, é apresentada uma visão geral das principais funções, técnicas e conceitos GIS.

2.3.1. Entrada de dados

A precisão dos mapas depende dos métodos de recolha de dados, da qualidade das fontes de informação e do padrão de precisão adoptado. Por conseguinte, o produto digital de uma região pode estar representado em diferentes padrões de precisão, causando limitações de utilização (Paredes, 1994).

O objectivo desta secção é revisar alguns dos principais métodos de entrada de dados.

2.3.1.1. Digitalização

A maior parte da informação contida nas bases de dados geográficas continua a ser oriunda da cartografia em suporte de papel, existindo dois métodos de digitalização para entrada de dados deste tipo de informação: manual e automática (Goodchild, 1991; Paredes, 1994).

A digitalização manual resume-se ao processo de captura de uma série de pontos e linhas por conversão em coordenadas das entidades que compõem um mapa. Este é colocado sobre a superfície de uma mesa digitalizadora, que consiste numa fina malha de linhas ortogonais usadas para detectar os impulsos eléctricos nos pontos especificados através de um rato com um cursor ou mira (Paredes, 1994). Em geral, este processo é muito moroso, exigindo um trabalho muito intenso e sujeito a muitos erros (Fisher, 1991).

Por sua vez, a digitalização automática recorre a *scanners* de mesa ou de tambor para converter documentos analógicos em formato *raster*, sendo usual num GIS para entrada de mapas e informação fotográfica. A qualidade desta informação está directamente dependente da resolução óptica do *scanner* e da qualidade da fonte original (Pazner et al., 1993).

Qualquer dos métodos apresenta limitações a nível de fontes actualizadas, precisão e resolução dos seus conteúdos. No entanto, relativamente à digitalização automática têm-se verificado avanços no que respeita ao desenvolvimento de *software* com capacidade de decisão eliminando-se, na conversão, o processo de pré-edição e pós-edição através de modelos matemáticos e princípios de cartografia geral.

2.3.1.2. Detecção remota

A detecção remota é a ciência e arte de obter informação acerca de um objecto, área ou fenómeno através da análise dos dados capturados por um dispositivo que não está em contacto directo com o objecto, área ou fenómeno sob investigação (Lillesand e Kiefer, 1994). Este processo é uma das principais fontes de dados relativamente à superfície terrestre e ambiente, para um GIS, sendo normalmente obtidos com recurso a aeronaves ou sensores espaciais (Jensen, 1996).

Na verdade, embora os mapas sejam uma importante fonte de informação geográfica digital, uma outra cada vez mais utilizada é a das imagens transmitidas pelos satélites de observação da Terra e a fotografia aérea (Neto, 1998).

De facto, os sistemas de satélites *Landsat* e *SPOT* (*Satellite pour l'Observation de la Terre*) são o principal fornecedor de dados detectados remotamente para gestão e monitorização dos recursos terrestres e do ambiente, e planeamento urbano, enquanto que a fotografia aérea é a forma de detecção remota mais comum, versátil e económica (Lillesand e Kiefer, 1994).

Não obstante, antes de poder ser incorporada num GIS, é necessário processar (reduzir ou simplificar) a informação obtida por satélite, num processo que envolve três etapas principais: pré-processamento, melhoramento e classificação (Jensen, 1996).

2.3.1.3. Sistemas de Posicionamento Global (GPS)

Um outro tipo de tecnologia de informação geográfica importante para entrada de dados diz respeito ao Sistema de Posicionamento Global (GPS) (DeMers, 2000). O GPS opera através de um sistema de satélites, em órbita em torno da Terra, usados para determinar as coordenadas exactas de uma localização desconhecida. Ainda que originalmente tenha sido desenvolvido pelo Departamento da Defesa dos Estados Unidos, para apoio à navegação, actualmente a tecnologia GPS é proficuamente utilizada em levantamentos geodésicos, digitalização "on-site" e localização de entidades (Malczewski, 1999).

Nesta tecnologia, cada satélite transmite continuamente informação a partir de relógios atómicos altamente precisos (atrasam ou adiantam cerca de um segundo em 30.000 anos) (Paredes, 1994). Os sinais transmitidos podem ser decodificados por receptores GPS para determinar posições específicas com precisão variável. No essencial, para calcular a distância a cada satélite, um receptor "lê" a informação transmitida pelos satélites e compara os sinais com os do seu relógio (Malczewski, 1999).

Pode parecer complicado calcular posições de localizações geográficas usando uma série de 24 satélites orbitando a uma altitude de 12.600 mi (Hohl, 1998). Como o método usado para calcular com precisão uma localização fixa é a triangulação, são necessários pelo menos 3 satélites visíveis simultaneamente (Paredes, 1994). Por este método, para cada um dos 3 satélites é necessário determinar, com precisão, as coordenadas de órbita e a distância à localização desejada. A posição orbital é transmitida ao receptor GPS em operações regulares, enquanto que a distância é calculada multiplicando a velocidade da luz

(186.000 mi/s) pelo tempo de demora do sinal transmitido desde o satélite ao ponto desejado. A utilização de um quarto satélite permite calcular também a altitude (Hohl, 1998).

Espera-se que os dados obtidos por GPS venham a ser cada vez mais usados em associação com as bases de dados espaciais existentes, quer para actualização quer em aplicações de tomadas de decisão espacial.

A localização e navegação de veículos, bem como a agricultura de precisão, são bons exemplos de integração de dados GIS/GPS para tomadas de decisão espacial. O primeiro permite a monitorização em tempo real da velocidade, localização e outros atributos de um veículo. Por outro lado, os métodos baseados em GIS/GPS para precisão agrícola envolvem pré-amostragem de dados de campo, criação de mapas, que associados com o GPS permitem gerir, por exemplo, a aplicação de pesticidas e fertilizantes.

2.3.1.4. Internet

Até recentemente a Internet apenas disponibilizava comunicações e recursos de apoio para profissionais GIS. No entanto, com a evolução que se tem vindo a verificar, este panorama alterou-se completamente, sendo actualmente a sua importância decisiva no que respeita a publicação e generalização de informação geográfica. Tornou-se assim, numa ferramenta fundamental para localização, avaliação e obtenção de dados para projectos e investigações baseadas em GIS.

São cada vez mais os utilizadores, Universidade, e Instituições, tais como *U.S. Geological Survey*, *U.S. Bureau of the Census* e a NASA, que criam domínios públicos de dados espaciais e programas/algoritmos para GIS, tendo vindo a aumentar o número de locais Web com apontadores para fontes de dados geográficos.

2.3.2. Armazenamento e organização de dados

Os métodos usados para implementar as funções necessárias ao armazenamento e organização dos dados de uma base de dados afectam a eficiência do sistema na execução de operações com os dados (Aronoff, 1989; Antenucci et al., 1991). A maioria dos sistemas GIS são orientados para bases de dados, que podem ser definidas como uma colecção de dados não redundante organizada computacionalmente de forma a que possa ser expandida, actualizada, manipulada e partilhada para várias utilizações. Todavia, uma base de dados GIS pode ser vista como uma representação ou modelo dos sistemas geográficos do mundo real. Assim sendo, é conveniente fazer a distinção entre entidades geográficas e objectos. Uma entidade geográfica é um elemento do mundo real, isto é, as entidades

pertencem ao espaço geográfico. Por sua vez, um objecto é uma representação GIS de uma entidade geográfica. Por exemplo, edifícios, estradas e parcelas de terreno, são entidades geográficas representadas em bases de dados GIS por primitivas fundamentais (pontos, linhas e polígonos). Os objectos são representados por dados cartográficos, que registam a sua localização, e dados alfanuméricos, com todos os atributos que descrevem as características do objecto (Malczewski, 1999).

2.3.2.1. Dados cartográficos

No processo de digitalização os dados cartográficos são estruturados num GIS segundo um de dois modelos distintos e incompatíveis: vectorial e *raster* (Egenhofer e Herring, 1991; Maguire e Dangermond, 1991; Malczewski, 1999), consoante o método de conversão é a digitalização manual ou automática, respectivamente.

Modelo vectorial

No modelo vectorial os dados cartográficos são armazenados num sistema de coordenadas fixas, dependente da carta base, em séries de coordenadas. Um ponto particular é uma coordenada, isto é, os pontos cartográficos são armazenados com as suas coordenadas "exactas", dependendo da precisão da fonte de origem e da capacidade de armazenamento do computador. Por sua vez, os pontos podem ser unidos formando linhas (rectas ou descritas por uma outra função paramétrica) ou polígonos. Nestes casos, ter-se-á uma série de coordenadas (Davis e Simonett, 1991; Maguire e Dangermond, 1991; Malczewski, 1999).

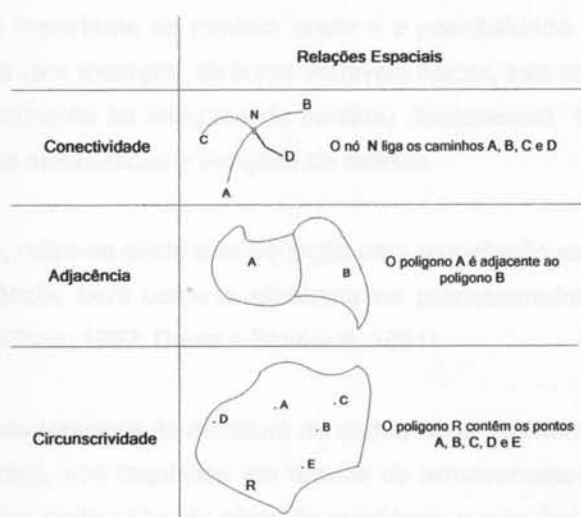


Figura 2.2 - Relações espaciais.

Na representação vectorial, uma topologia é um processo matemático para definir explicitamente os relacionamentos espaciais entre objectos (pontos, linhas e polígonos) permitindo que um GIS execute funções de análise espacial sobre dados cartográficos. Destacam-se três tipos de relações espaciais (Figura 2.2): conectividade (linhas são unidas por nós), adjacência (polígonos adjacentes partilham uma linha fronteira comum) e circunscrição (um polígono pode conter outros objectos). A topologia pode ser armazenada como parte da representação cartográfica (em tabelas da base de dados) ou construída a partir das coordenadas de cada entidade (Chou, 1997; Malczewski, 1999).

Modelo raster

No formato *raster* os dados são armazenados numa matriz bidimensional de células uniformes (*pixels*), normalmente quadradas ou pelo menos rectangulares, sobre uma grelha regular. Cada célula é supostamente homogênea, não sendo possível fornecer informação de qualquer resolução superior (DeMers, 2000).

Refira-se ainda que, na estrutura *raster*, a única topologia é a adjacência da célula, estando implícita na representação (i.e., definida por uma grelha de endereços), não explícita como na topologia vectorial (Malczewski, 1999).

Raster vs Vectorial

Ambas as representações têm vantagens e desvantagens (Burrough, 1986; Martin, 1991; DeMers, 1997).

Uma vantagem importante do modelo *raster* é a possibilidade de representar dados com variação contínua (por exemplo, diversas variáveis físicas, tais como a pluviosidade ou a temperatura, e tipicamente as imagens de satélite) (Malczewski, 1999). Este formato é nativo às digitalizações automáticas e imagens de satélite.

Adicionalmente, refira-se ainda a adequação para modelação espacial, a simplicidade e facilidade de referência, bem como a eficiência no processamento de sobreposição e agregação de dados (Chou, 1997; Davis e Simonett, 1991).

As principais desvantagens da estrutura de dados *raster* residem na resolução fixa, no grande volume de dados, nos requisitos em termos de armazenamento e processamento, na desapropriação para cartografia de elevada qualidade e nas limitações em termos de análise espacial (Malczewski, 1999).

Por sua vez, a representação vectorial está directamente relacionada com as tecnologias gráficas, sendo muito adequada para entrada e saída de dados através de periféricos que funcionem segundo este formato: mesas digitalizadoras, para entrada de dados, e traçadores, para saída dos dados. (Mendes, 1995). Refiram-se ainda as vantagens no que respeita à precisão, topologia, qualidade de saída e redundância de dados, pelo menos quando comparada com o formato *raster* (Chou, 1997). A maior desvantagem desta representação reside no facto de não ser apropriada a dados com variação contínua.

2.3.2.2. Dados alfanuméricos

Como referido anteriormente, os objectos geográficos são descritos em termos da sua localização espacial, bem como dados alfanuméricos que descrevem as suas propriedades. Para suportar estes dois tipos de dados, embora alguns GIS's utilizem sistemas de gestão de ficheiros, a maioria recorre a sistemas de gestão de bases de dados (SGBD). Cada sistema de base de dados organiza os dados armazenados segundo uma estrutura própria. Surgem, assim, vários modelos de bases de dados, destacando-se: o modelo hierárquico - baseado numa estrutura em árvore; modelo em rede - cuja base de modelação é o conjunto, o modelo relacional - onde a estrutura básica são tabelas; e o modelo orientado por objectos - em que a concepção assenta em quatro abstracções: classificação, generalização, associação e agregação.

Não obstante, os modelos de dados GIS podem também ser classificados de acordo com a arquitectura de manipulação. A este propósito, Maguide (1995) apresenta a seguinte classificação: sistema de gestão de ficheiros, modelo de dados híbrido, e sistema de gestão de base de dados integrada.

Nos sistemas de gestão de ficheiros, todos os dados são armazenados em ficheiros em forma tabulares, que consistem numa simples colecção de registos (que representam entidades) para as quais existem idênticas categorias de dados (atributos) associadas com cada registo. Refira-se ainda que, cada categoria de dados denomina-se por campo, todos os registos possuem o mesmo número de campos, existindo um campo que serve de chave de identificação dos registos (Malczewski, 1999). Uma das características principais dos sistemas de gestão de ficheiros é que os programas de aplicação que os constituem e os ficheiros de dados que processam se encontram ligados por interfaces físicas. Nestes sistemas, a estrutura física dos dados e a sua organização nos ficheiros é parte integrante da lógica dos programas (Pereira, 1998). Alguns GIS, nomeadamente IDRISI, IMAGINE e ERDAS recorrem a esta abordagem. Apesar da sua simplicidade este método é pouco flexível, sendo difícil processar múltiplos valores de atributos, adicionar novos registos, e a adição de novos campos requer reprogramação (Huxhold, 1991).

Relativamente ao **modelo de dados híbrido**, os dados espaciais são armazenados num conjunto de ficheiros de acesso directo pelo sistema operativo por questões de velocidade de entrada/saída, enquanto que os dados alfanuméricos são geralmente armazenados num sistema de gestão de base de dados. Neste caso, ao *software* GIS incumbe a responsabilidade de gestão das ligações entre os dados cartográficos e o SGBD durante as operações de mapeamento.

O **modelo de base de dados relacional**, usual para organização de dados em GIS, foi fruto de um desenvolvimento teórico que tem por base a teoria dos conjuntos. Na verdade, uma base de dados relacional consiste num conjunto de tabelas, cada uma das quais com um nome único. No modelo de bases de dados relacionais, o conceito de tabela e o conceito matemático de relação estão estreitamente ligados. Uma tabela constitui a materialização do conceito mais geral de relação (Carriço, 1998), sendo constituída por linhas, colunas e células (Healey, 1991). As linhas também denominadas como registos (*records*) ou ocorrências, contêm as características de uma entidade. As colunas, também designadas como campos (*fields* ou *items*), contêm atributos das diferentes entidades. Por fim, as células possuem os valores de um atributo de uma entidade.

Se duas ou mais tabelas tiverem um ou mais campos comuns então é possível estabelecer relacionamentos entre elas ou, mais especificamente, entre os respectivos registos (Healy, 1991). A este modelo está subjacente a álgebra relacional com os seus operadores próprios de intersecção, união, diferença, produto cartesiano, selecção, junção natural, projecção, e divisão.

Entre as principais vantagens que este modelo apresenta, destacamos: a metodologia de organização dos dados bastante rigorosa baseada num corpo teórico bem fundamentado; facilidade de utilização e execução; facilidade de modificação dos dados sem que sejam afectadas os relacionamentos entre os registos, permitindo a construção de novas tabelas, bem como a adição sem dificuldades de novas ocorrências nas tabelas existentes; e facilidades na recuperação de dados proporcionada pelo mecanismo de ligação relacional e da potente linguagem de interrogação associada.

Os sistemas ARC/INFO, *Modular GIS Environment* (MGE), *Autodesk Map/MapGuide*, *SmallWorld GIS*, entre outros, são exemplos de modelos de dados híbridos empregando SGBD relacional.

Por fim, na abordagem de **modelo de dados integrado**, o GIS serve de processador de consultas à base de dados. Os sistemas SYSTEM9 e GEOVISION, são dois bons exemplos da utilização deste tipo de modelo (Maguire, 1995).

2.3.2.3. Camadas de dados (*Data layers*)

Uma vez identificadas as entidades e respectivos atributos, geralmente, nos sistemas GIS, estas são organizadas e separadas em mapas temáticos (camadas, coberturas ou níveis), de acordo com dois critérios: os tipos de entidades (ponto, linha os polígonos) e o seu agrupamento temático (Paredes, 1994).

Para que se possa assegurar que todos os mapas da base de dados GIS estão sobrepostos com precisão, todas as *layer* devem ser georeferenciados a um sistema de coordenada comum.

A organização das entidades em mapas temáticos pode ser realizada em ambos os modelos de dados *raster* e vectorial (Goodchild, 1995).

2.3.2.4. Abordagem orientada por objectos

Segundo alguns autores, os GIS baseados em objectos ou orientados por objectos são uma alternativa às *layers* (Egenhofer e Frank, 1987; Maguide e tal., 1990; Worboys, 1994; Woodsford, 1995). Nestes sistemas, pretende-se que os objectos representem os elementos do mundo real.

O principal argumento subjacente à abordagem orientada por objectos para bases de dados GIS reside no facto de que a definição dos objectos deve ser uma parte integral das operações realizadas sobre estes. Argumenta-se que é artificial separar a natureza da variação geográfica das operações (análise, modelação) executadas nessa variação geográfica.

As abordagens orientadas por objectos concedem-se a modelar qualquer "todo" composto por elementos separados interagindo. Assim um sistema urbano pode ser modelado por uma série de unidades interagindo, cada uma das quais é composta por habitações interagindo, que por seu turno são compostas por interacções individuais.

Argumenta-se que a abordagem orientada por objectos aprovisiona uma solução para a integração das estruturas *raster* e vectorial, tão bem como a integração do GIS e a modelação espacial (Raper e Livingstone, 1996). Outra vantagem é a flexibilidade e

eficiência de modelação da realidade dos sistemas geográficos. A tecnologia orientada por objectos tem grande valor na criação, exploração, e actualização de dados geográficos. O modelo de dados orientado por objectos permite mapeamento directo para a base de dados das inerentemente complexas entidades físicas. Além disso, a aproximação provê uma ferramenta para projectar bases de dados de grandes dimensões e para implementar procedimentos com regras base. Porém, pode-se argumentar que estes são todos benefícios relevantes para os fomentadores de sistemas em lugar dos utilizadores GIS.

Implementações completas da tecnologia de bases de dados orientadas por objectos para aplicações GIS só recentemente foi empreendida. Ainda não está provado se esta tecnologia revolucionará as aplicações GIS ou se o progresso será sustentado pela existente geração da tecnologia relacional. Não obstante, implementações bem sucedidas de sistemas GIS orientados por objectos têm sido referidas em aplicações de gestão de instalações (Hartnall e MacAllister, 1995), planeamento de transportes (Ralston, 1994), geomorfologia (Raper e Livingstone, 1995), e gestão de recursos de água (Watkins e McKinney, 1995). Vários sistemas GIS orientados por objectos estão disponíveis (por exemplo, Smallworld GIS, GDS - Graphic Data System, e MapObjects). Por exemplo, no MapObjects, um GIS desenvolvido e comercializado pelo *Environmental Systems Research Institute* (ESRI), os objectos são elementos das funcionalidades GIS que são embutidos num ambiente de programação em *Microsoft Visual Basic*.

2.3.3. Manipulação e análise de dados

Os sistemas de informação geográfica diferenciam-se pelas suas capacidades para executar análises integradas de dados alfanuméricos e cartográficos. Os dados são manipulados e analisados para que seja possível, a uma aplicação particular, obter informação útil.

Os sistemas actuais disponibilizam um conjunto de operações analíticas, classificadas de diversas formas por vários autores (por exemplo, Goodchild, 1987; Aronoff, 1989; Star e Estes, 1990; Burrough, 1992b). Não obstante, no âmbito da sua utilização em termos de análise espacial, podem-se agrupar em duas categorias principais de funções GIS: fundamentais (ou essenciais) e avançadas.

2.3.3.1. Funções fundamentais

As funções fundamentais podem ser consideradas como operações de análise primária (Berry, 1986) ou ferramentas GIS (Dangermond, 1986), estando actualmente a

maioria dos GIS equipados com todas ou grande parte destas operações de análise espacial.

Da selecção efectuada, nesta categoria englobam-se funções de: medida, (re)classificação, operações escalares, de sobreposição, conectividade e vizinhança.

Medida

As funções de medida proporcionam cálculos associados com pontos, linhas, áreas e volumes (Dangermond, 1986; DeMers, 1997). Uma das operações mais simples consiste em determinar o número de pontos e/ou linhas de uma *layer* de dados contidos num polígono específico. No entanto, as mais usuais respeitam ao cálculo de distâncias, áreas e volumes.

As medidas de linha envolvem a determinação da distância entre dois pontos ao longo de uma linha recta ou curvilínea (DeMers, 1997). Por exemplo, o comprimento do trajecto de um veículo pode ser determinado através de funções de medida de linha.

Relativamente a áreas existem duas funções essenciais. Uma que permite determinar a área de um polígono e outra o seu perímetro.

Por sua vez, no que se refere à determinação de volumes é possível realizar esta operação através da técnica de secção cruzada (*cross-section*) ou de sobreposição de superfícies.

A maioria dos GIS possui capacidades de cálculo de distâncias e áreas, de forma interactiva, com auxílio do rato para desenhar uma linha ou polígono, respectivamente. Enquanto que nos sistemas vectoriais é calculado automaticamente o comprimento do segmento de recta definido entre dois pontos especificados, por sua vez, os GIS's *raster* calculam o número de células que separam dois pontos ou que definem uma área (Pazner et al, 1993). Neste caso, para obtermos medidas reais, é necessário converter o número de células em distância ou área, estando a precisão limitada ao seu tamanho. Assim, facilmente se conclui que os sistemas vectoriais são mais precisos, sendo a sua precisão apenas limitada pela precisão dos pontos armazenados na base de dados.

(Re)Classificação

As operações de classificação e reclassificação transformam os dados alfanuméricos associados a uma *layer* (Davis, 1996; DeMers, 1997). Os objectos são agrupados em classes de acordo com os novos valores atribuídos aos objectos dos dados de entrada de acordo com determinados valores posicionais e não posicionais. Esta organização de dados é particularmente útil quando se trabalha com numerosas entidades e uma gama extensa de valores para os vários atributos (Chou, 1997).

A classificação implica o reconhecimento de padrões e organização dos dados envolvidos para uma análise particular. Por conseguinte, os procedimentos de reclassificação podem ser agrupados em duas categorias. Uma envolvendo valores de atributos temáticos associados a uma *layer*, e outra baseada nas propriedades topológicas dos objectos de uma *layer* particular. Em qualquer dos casos, os valores da *layer* de saída são uma função dos valores da *layer* de entrada (Berry, 1993).

Na reclassificação topológica, os novos valores são uma função da posição, contiguidade, tamanho, ou forma do modelo espacial representado na *layer* de entrada.

Por sua vez, a reclassificação baseada nos valores dos atributos pode envolver operações de comparação (igual, maior, menor, maior ou igual, e menor ou igual) para determinação da existência de uma relação entre o valor associado a um objecto particular e um valor constante deduzido ou especificado (limiar). Em caso de veracidade da condição é atribuído ao objecto o valor 1, caso contrário o valor 0.

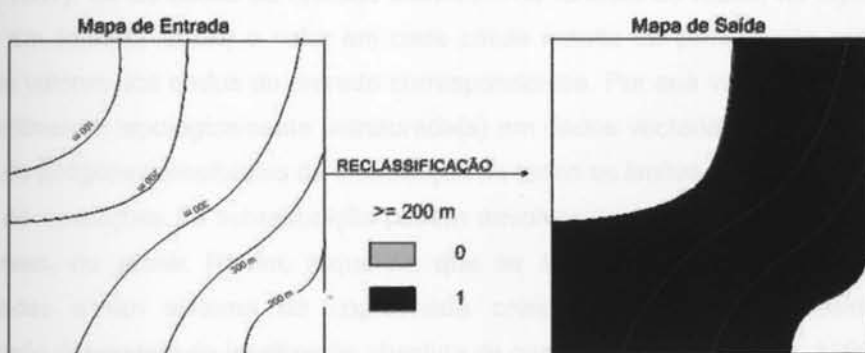


Figura 2.3 - Exemplo da operação de comparação maior ou igual.

É importante notar que os operadores de comparação podem ser usados para atributos qualitativos e quantitativos, bem como ser combinados.

Outra forma de (re)classificação baseia-se nas propriedades geométricas e topológicas dos objectos contidos na *layer* de entrada. A *layer* de saída é uma função das propriedades topológicas da *layer* de entrada. A função pode envolver reclassificação de acordo com a localização do objecto, contiguidade, tamanho, forma, ou modelo espacial das categorias individuais (Berry, 1993). Este tipo de reclassificação pode ser aplicado relativamente a pontos, linhas, e áreas. Similarmente, os objectos da *layer* de entrada podem ser classificados com base na contiguidade. Especificamente, objectos com os mesmos (ou similares) atributos e espacialmente contíguos podem ser classificados em várias categorias. Berry, (1993) apresenta vários exemplos deste tipo de classificação.

Operações escalares

O objectivo da sua utilização é provocar alterações em todos os objectos de uma *layer* de dados. A *layer* de entrada (original) é operada com uma outra, uniformemente constituída, em todas as suas localizações, por um único valor constante - escalar. Os atributos da *layer* de saída contêm novos valores, dependendo do tipo de operação (adição, subtracção, multiplicação, divisão e potenciação) e do valor escalar.

Operações de sobreposição

Um procedimento de sobreposição gera uma nova *layer* como função de duas ou mais *layers* de entrada. Especificamente, o valor do atributo de cada localização (ou conjunto de localizações) na *layer* de saída é a função dos valores independentes associados com aquela localização na(s) *layer(s)* de entrada (Tomlin, 1990; Berry, 1993; Hopkins, 1997). Se os dados de entrada estiverem no formato de *raster*, na *layer* de saída (também em formato *raster*) o valor em cada célula resulta da combinação aritmética ou lógica dos valores dos dados de entrada correspondentes. Por sua vez, se a(s) *layer(s)* de entrada estiverem topologicamente estruturada(s) em dados vectoriais, a saída é um novo conjunto de polígonos resultantes da intersecção de todos os limites nas *layers* de dados de entrada. As operações de sobreposição podem envolver qualquer combinação de pontos, linhas, áreas, ou *pixels*. Porém, requerem que as *layers* de dados sobrepostas sejam referenciadas a um sistema de coordenada comum, isto é, os procedimentos de sobreposição dependem da localização absoluta de cada objecto. (Chrisman, 1996).

Para os dados *raster*, é necessário que as *layers* de dados possuam uma grelha de referência comum, que pode ser obtida por reamostragem dos dados de entrada. A reamostragem transforma os dados da grelha de entrada para um sistema de grelha diferente (saída) com a mesma área, "ampliando" ou "reduzindo" as células, para que as suas dimensões correspondam à das células da grelha de entrada. Às novas células são

então atribuídos valores por reamostragem da grelha de entrada e, se necessário, estimado o novo valor, normalmente, por interpolação ou atribuído o valor do correspondente à célula do vizinho mais próximo. Na inferência de valores, se o método for a interpolação, usualmente, o valor de saída é a média das distâncias ponderadas dos quatro vizinhos mais próximos na grelha de entrada. Não obstante, podem ser aplicados outros métodos de interpolação (Eastman, 1993; Chrisman, 1996).

O preprocessamento para operações de sobreposição em ambientes de dados vectoriais requer a combinação da estrutura topológica (Environmental Systems Research Institute, 1995). Na figura 2.4 apresentamos um exemplo com *layers* de polígonos.

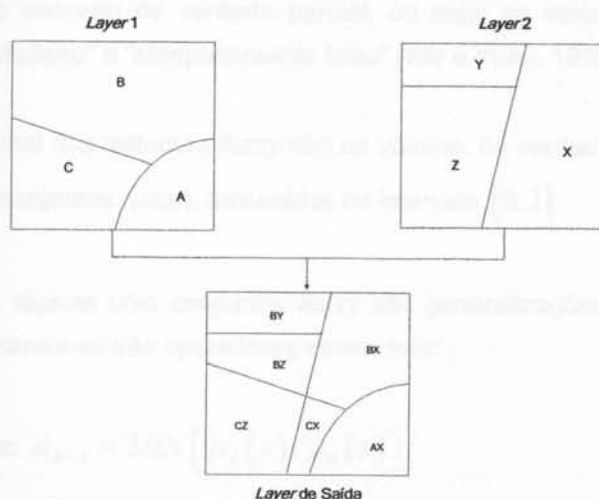


Figura 2.4 - Exemplo de preprocessamento para *layers* de polígonos.

Como se pode verificar, a *layer* de saída é uma nova estrutura topológica que preserva as características das *layers* de entrada e, adicionalmente, as correspondentes aos novos polígonos resultantes da operação de sobreposição.

Dependendo da natureza dos dados contidos nas *layers* de entrada, podem ser executadas operações de sobreposição algébricas (adição, subtração, multiplicação, divisão e potenciação), estatísticas (por exemplo, média, máximo e mínimo), lógicas (intersecção - AND, reunião - OR, e complementar - NOT), probabilísticas e de manipulação *fuzzy* (Bracken e Webster, 1990).

Como referido, as operações de sobreposição podem ser executadas em *layers* que contêm probabilidades de eventos, isto é, valores numéricos que expressam a probabilidade de ocorrência de um evento relativamente a todas as possibilidades no espaço da amostra.

Existem três leis da teoria das probabilidades que nos permitem combinar probabilidades de eventos:

Intersecção: $p_{A \cap B}(x) = p_A(x) p_B(x)$

União: $p_{A \cup B}(x) = [p_A(x) + p_B(x)] - p_A(x) p_B(x)$

Complementar: $p_{\sim A}(x) = 1 - p_A(x)$

Por último, refira-se ainda, a classe de operadores de sobreposição baseada na lógica *fuzzy*, isto é, um superconjunto da lógica convencional (Booleana), estendido de forma a abranger o conceito de verdade parcial, ou seja, os valores de verdade entre "completamente verdadeiro" e "completamente falso" (Klir e Yuan, 1995).

A noção principal dos sistemas *fuzzy* são os valores, de verdade (na lógica *fuzzy*) ou dos elementos (nos conjuntos *fuzzy*), assumidos no intervalo $[0, 1]$.

As operações lógicas com conjuntos *fuzzy* são generalizações da álgebra Booleana convencional, destacando-se três operadores essenciais:

Intersecção: $\mu_{A \cap B} = \text{MIN}[\mu_A(x), \mu_B(x)]$

O operador *MIN* determina o grau para o qual x pertence a ambos os conjuntos (A e B), e é igual ao menor dos graus individuais dos elementos.

União: $\mu_{A \cup B} = \text{MAX}[\mu_A(x), \mu_B(x)]$

O operador *MAX* determina o grau para o qual x ou pertence a A ou B , e é igual ao maior dos graus individuais dos elementos.

Complementar: $\mu_{\sim A} = 1 - \mu_A(x)$

O operador *NOT* determina o grau para o qual x não pertence a A e é igual à subtração entre 1 e o grau de x pertencer a A .

Na figura 2.5 é apresentado um exemplo da operação intersecção.

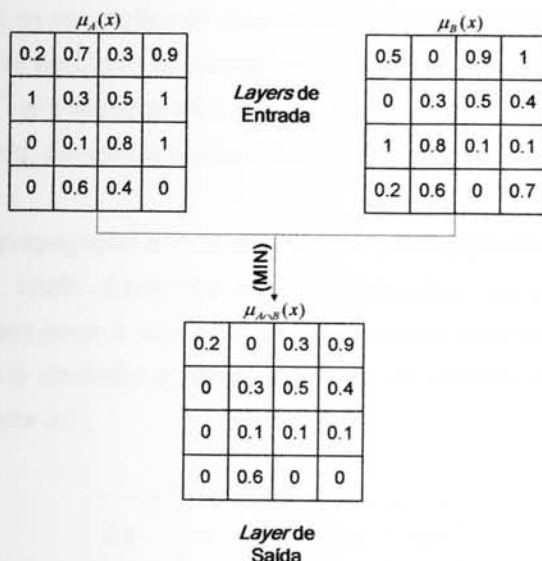


Figura 2.5 - Exemplo da operação fuzzy MIN.

Operações de conectividade

O conceito de conectividade é conotado de modo diferente no contexto das estruturas vectoriais e *raster* (Eastman, 1993; Environmental Systems Research Institute, 1995).

No que respeita à estrutura vectorial, o termo conectividade é usado para descrever a união de pontos ou polígonos. Por sua vez, para dados *raster* a conectividade descreve a união entre dois *pixels*, isto é, se estão ou não unidos, e se unidos, o tipo do união envolvida. As funções de conectividade envolvem operações de proximidade, *buffering*, propagação (*spread*), e análise de rede.

As operações de proximidade geram zonas concêntricas equidistantes na vizinhança de uma localização específica ou conjunto de localizações (Berry, 1993), requerendo quatro parâmetros (Aronoff, 1989): as localizações dos objectos visados (pontos, linhas, ou áreas), a unidade de medida (metros, quilómetros, milhas, entre outras), uma função para calcular a proximidade (dependendo das aplicações particulares, a proximidade pode ser medida em termos do número de *pixels*, distância, tempo de viagem, níveis de ruído, entre outras), e a área a ser analisada (por exemplo, a área total coberta por uma *layer* ou região). As superfícies de proximidade resultantes são a base para a determinação das zonas de *buffer*, isto é, a região ou zona, de largura especificada pelo utilizador ou gerada para um conjunto de objectos com base nos valores dos seus atributos, em torno de um ponto, linha ou polígono.

Por conseguinte, as operações de proximidade geram fronteiras em torno de objectos para uma distância igual em todas as direcções, daí resultando em regiões binárias onde o *buffer* assume o valor 1 e a restante área de estudo o valor 0. A *layer* de saída pode então ser usada para recuperar, resumir, e analisar dados dentro da zona de *buffer*.

A operação de propagação é uma extensão e generalização dos procedimentos de proximidade (Aronoff, 1989). Enquanto que as operações de proximidade utilizam a distância Euclidiana para gerar a superfície de proximidade, nas funções de propagação a distância corresponde à distância mínima resultante do cálculo das distâncias entre as células envolvidas (Figura 2.6).

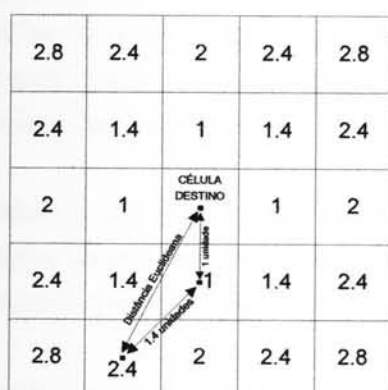


Figura 2.6 - Operação de propagação: cálculo da distância.

As operações de propagação são úteis, por exemplo, para determinação do tempo de viagem mínimo entre dois locais, ou para simulação do percurso de materiais poluentes ao longo de um rio.

Outra classe de funções de conectividade respeita à análise de rede. Nos GIS *raster* este tipo de operações está estreitamente relacionado com os procedimentos de proximidade e propagação. Na verdade, pode ser realizado usando as *layers* de saída resultantes da análise de proximidade e propagação. Por exemplo, a superfície de proximidade pode ser combinada com uma *layer* contendo a rede e o par de pontos para identificar o caminho mais curto entre dois pontos (células). Similarmente, a análise de distribuição pode ser executada combinando a proximidade com uma *layer* de estradas e os pontos designados. Dando identificadores únicos a cada estrada é atribuído a cada célula o identificador da estrada mais próxima (Aronoff, 1989; Eastman, 1993).

Não obstante, este tipo de análise é um domínio dos GIS vectoriais uma vez que, na estrutura de dados vectorial, uma rede é a interligação de um conjunto de arcos que representam caminhos possíveis para a movimentação entre pontos ou nós de recursos, pessoas, informação, serviços, entre outras. Assim, uma rede pode ser armazenada num

GIS vectorial como uma *layer* contendo um conjunto de pontos e arcos. As operações de rede usam a estrutura topológica das linhas para seguir o caminho entre nós e então processar os valores do atributo associado com cada segmento.

Operações de vizinhança

Esta classe de operações envolve atribuição de valores a um local de acordo com as características da área circundante. Especificamente, o valor atribuído a cada local na *layer* de saída é uma função de valores independentes na sua vizinhança na *layer* de entrada.

Para executarmos operações de vizinhança, é necessário especificar, pelo menos, três parâmetros: o local ou locais designados, a vizinhança (isto é, um conjunto de localizações circundantes a cada ponto designado dentro de uma distância e direcção especificada) e a função a ser executada nos locais dentro da vizinhança (Aronoff, 1989).

Para especificar a vizinhança são normalmente usadas matrizes de células 3x3 ou 5x5. Para este fim, as operações de vizinhança podem ser vistas como janelas flutuantes que se movem sobre área mapeada (Berry, 1993).

Dependendo dos parâmetros especificados, podem ser definidas várias operações de vizinhança. Seguidamente, apresentam-se as operações mais usuais.

As funções de vizinhança incluem procedimentos, tais como operações de pesquisa e superfície, e interpolação (Aronoff, 1989).

Operações de pesquisa

Para este tipo de operações é necessário especificar os locais designados e a vizinhança. Especificados estes dois parâmetros, é aplicada uma operação algébrica ou estatística (soma, média, moda, variância, desvio padrão, mínimo, máximo, entre outras) aos locais interiores à janela. O valor resultante é atribuído a cada local dentro da vizinhança.

Na figura 2.7 é apresentado um exemplo ilustrativo da aplicação da operação soma com uma janela 3x3.

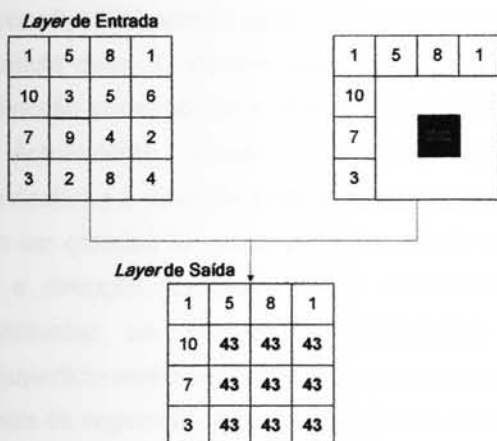


Figura 2.7 - Exemplo da operação de pesquisa soma.

As operações referidas anteriormente podem ser combinadas de modo a poder obter-se funções de vizinhança mais complexas (Monmonier, 1974; Murphy, 1985; Eastman, 1997).

Refira-se ainda que, não é necessário que a janela seja regular (quadrado, rectângulo, ou círculo). Por exemplo, no contexto da análise de redes, a vizinhança pode ser definida em termos de tempo de viagem, o que resulta numa região irregular.

Ponto/linha-em-polígono

Esta classe de funções de vizinhança é restrita aos GIS vectoriais, consistindo na determinação dos pontos/linhas interiores a um polígono. Os seus atributos podem então ser processados para análise, por exemplo, calculando-se estatísticas dos valores do atributo e listando os valores numa tabela. Estas operações são tipicamente executadas através de procedimentos topológicos de sobreposição.

Operações de superfície

Envolvem o cálculo de características topográficas, tais como declive e direcção do modelo digital de terreno (*Digital elevation Model* - DEM) (DeMers, 1997). O declive corresponde à inclinação de um terreno, sendo normalmente medido em graus ou percentagens, enquanto que a direcção desse declive é expresso em termos de graus Norte.

Num determinado local (célula) de uma superfície, estas características podem ser determinadas ajustando um plano aos valores correspondentes à altimetria das

células vizinhas (Aronoff, 1989), sendo geralmente calculadas usando uma vizinhança 3x3 centrada na célula dada. O declive deste plano é o valor atribuído à célula, enquanto que a direcção corresponde à direcção da célula (Petrie e Kennie, 1990; Jensen, 1996). Actualmente alguns GIS possuem funções para gerar automaticamente o declive e a direcção a partir de um DEM (por exemplo, IDRISI).

Além disso, podem ser geradas imagens de relevo sombreadas a partir de *layers* de dados do declive e direcção (Eastman, 1997). As operações de superfície são frequentemente utilizadas em gestão e planeamento ambiental porque as características da superfície estão espacialmente correlacionadas com tipos de solo e vegetação, densidade de vegetação, entre outras (Petrie e Kennie, 1990).

Interpolação

Os procedimentos de interpolação estimam os valores dos atributos não amostrados (desconhecidos) a partir dos dados conhecidos em localizações vizinhas. Os dados amostrados podem estar associados a pontos, linhas, ou áreas.

Dos vários métodos de interpolação disponíveis (Lam, 1983; Burrough, 1986; Langford e tal., 1991; Martin, 1991; Burrough e McDonnel, 1998) um dos mais simples e comum é o inverso ponderado das distâncias, disponibilizado em alguns sistemas GIS (por exemplo, GRASS e IDRISI). No entanto, outros métodos bem mais complexos têm sido desenvolvidos para aplicações particulares no âmbito das ciências ambientais, entre os quais se destaca: regressão polinomial, análise de superfície de tendência e krigagem. Estas técnicas de interpolação têm por base um processo estocástico para a distribuição espacial de eventos (Isaaks e Srivastava, 1989) e fazem parte da metodologia geoestatística e funções avançadas GIS.

2.3.3.2. Funções avançadas

As funções apresentadas na secção anterior consistem em operações geométricas de baixo nível podendo ser consideradas como ferramentas que constroem relações entre objectos espaciais. Não obstante, para um efectivo apoio a tomadas de decisão espacial, os GIS devem ainda disponibilizar capacidades de manipulação matemática e estatística de dados, baseadas em modelos teóricos (Parker, 1988; Densham e Goodchild, 1989).

Modelação estatística

É vantajoso fazer a distinção entre geoestatística e estatística convencional (Griffith e Amrhein, 1991; Arlinghaus, 1996). A última é baseada em variáveis independentes aleatórias que assumem continuidade zero e não permite estimar valores para células individuais, ou pontos num mapa ou área. A estatística convencional pode ser usada na análise espacial de dados, embora não seja dada qualquer relevância à natureza específica dos dados geográficos. Por sua vez, na geoestatística assume-se que as localizações (áreas) adjacentes relacionam-se espacialmente umas com as outras. O que distingue a geoestatística é o facto de se concentrar na associação espacial entre valores observados em diferentes localizações (dependência espacial) e a variação sistemática do fenómeno (heterogeneidade espacial ou não estacionariedade) (Anselin, 1990; Anselin e Getis, 1992). No entanto, a estatística convencional aplicável a dados espaciais é suportada por muitos sistemas GIS, enquanto que as técnicas de estatística espacial estão disponíveis em sistemas especialmente desenvolvidos ou que integrem GIS e *software* geoestatístico (Zhang e Griffith, 1997). Para este fim, distinguem-se três estratégias distintas de ligação entre um GIS e a análise estatística: *Estratégia encompassing*, *Estratégia modular* e *Importação/Exportação de dados* (Anselin e Getis, 1992).

A *estratégia encompassing* permite total integração da estatística espacial e convencional com um sistema GIS. Existem vários sistemas integrados *stand-alone* para estatística espacial. O sistema MAP-INFO, desenvolvido por Bailey e Gatrell (1995), é disso um bom exemplo, já que suporta uma extensa série de modelos espaciais, incluindo estatísticas para pontos, áreas e dados com variação contínua, assim como modelação da interacção espacial. O sistema dá ênfase à aproximação interactiva e exploratória para análise espacial. Similarmente, Haslet et al. (1990) desenvolveram um sistema exploratório interactivo de análise de dados espaciais chamado SPIDER. O sistema suporta análise descritiva usando histogramas e semivariogramas. Anselin (1995) desenvolveu o pacote de estatística espacial denominado SpaceStat, que inclui uma extensa série de ferramentas exploratórias para análise de dados espaciais, assim como vários testes e métodos de estimação usados em estatística espacial. Adicionalmente, o SpaceStat tem sido integrado com sistemas GIS, tais como o ArcView, IDRISI, e GIS-PLUS (Anselin e Shuming, 1996). S+SpatialStats é um exemplo de um *software* estatístico orientado por objectos, para análise geoestatística, com capacidades GIS. Entre outras, variogramas, krigagem, correlogramas e modelos de regressão espacial, são funcionalidades disponibilizadas.

A *estratégia modular* envolve a construção de módulos de análise estatística e sua ligação com um GIS. Por exemplo, o pacote estatístico GLIM (*Generalized Linear Interactive Modeling*) foi ligado ao ARC/INFO (Flowerdew e Green, 1994). Alternativamente, as

linguagens macro ARC/INFO AML e ArcView Avenue podem ser usadas para construir módulos para geoestatística (Ding e Fotheringham, 1992; Zhang e Griffith, 1997).

Por último, a estratégia de **Importação/Exportação** de dados envolve uma expansão das ferramentas de análise espacial disponíveis no GIS por transferência de dados entre GIS e pacotes estatísticos. Sendo certo que qualquer GIS possui ferramentas para importação e exportação de dados, normalmente é possível aceder às variáveis necessárias e importá-las para um pacote estatístico ou folha de cálculo, e vice-versa. Como exemplos refira-se a articulação do sistema GRASS e o pacote estatístico S+ para análise exploratória de dados, e ARC/INFO e SAS (Maguide, 1995).

Pelo exposto, as funcionalidades dos GIS em termos de análise estatística podem ser classificadas em: amostragem, estatística descritiva, análise multivariada, análise de série temporais, e análise geoestatística.

Modelação matemática

No que respeita à modelação matemática, em ambientes GIS, destaca-se principalmente a optimização e a simulação (Fotheringham e Rogers, 1994; Steyaert e Goodchild, 1994).

Optimização

A optimização é uma abordagem normativa para identificar a melhor solução para um determinado problema de decisão (Wilson et al., 1981; Thomas e Huggett, 1980). Decidir é escolher ou optar entre alternativas viáveis. Neste sentido, os métodos de optimização procuram encontrar a melhor solução para um problema de gestão bem definido, isto é, que está estruturado de forma a que o método possa ser utilizado. Comum a todos os modelos de optimização é a(s) quantidade(s) a ser(m) minimizada(s) ou maximizada(s). A quantidade é frequentemente denominada de objectivo ou função critério. Por exemplo, numa empresa transportadora o objectivo pode ser minimizar os custos totais de transportes. Além disso, os problemas de optimização têm tipicamente um conjunto de restrições impostas nas variáveis de decisão. Por exemplo, num mapa rodoviário podemos ter limitações em termos de rotas de transportes. As restrições definem o conjunto de soluções possíveis. A solução para um problema de optimização determina os valores das variáveis de decisão sujeitos a um conjunto de restrições. Assim, em termos muito gerais um modelo de optimização pode escrever-se como:

Minimiza ou maximiza $f(x)$, $x \in X$

Onde,

$f(x)$ é uma função critério, x é o conjunto de variáveis de decisão, e X é um conjunto de alternativas possíveis.

Em problemas de otimização, a programação matemática assume particular relevância e em especial uma sua subclasse - a programação linear (Greenberg, 1978; Thomas e Huggert, 1980; Dykstra, 1984; Killen, 1983), uma ferramenta de investigação operacional¹.

Num modelo de programação linear a função objectivo e as restrições são lineares e aditivas. Além disso, assume-se que as variáveis de decisão são contínuas.

Têm sido desenvolvidos vários métodos de solução para modelos de programação de otimização (especialmente programação inteira e linear), estando disponíveis diversos suportes lógicos ou código de programação. Além disso, a Internet é um importante recurso; por exemplo, o *Optimization Technology Center* (<http://www.mcs.anl.gov/home/otc/index.html>), do *Aragonne National Laboratory* e a *Northwestern University*, desenvolveram o *Network-Enabled Optimization System* (NEOS) - um servidor para resolução remota de problemas de otimização através da Internet.

De uma maneira geral, os GIS's possuem capacidades muito limitadas para controlar problemas de otimização (Macmillan e Pierce, 1994). Todavia, em GIS, os dados vectoriais e as estruturas orientadas por objectos são mais apropriados para incorporar rotinas de otimização (Ralston, 1994), estando comercialmente disponíveis vários sistemas vectoriais que suportam alguns tipos de procedimentos de otimização. Em particular, os modelos em rede foram efectivamente integrados em sistemas GIS. Por exemplo, ARC/INFO - Network Analyst, MapInfo, e Trans/CAD, têm capacidades para executar uma variedade de análises de otimização em rede. O Trans/CAD é o mais flexível. É um sistema que integra completamente muitos problemas de decisão espacial em redes com capacidades GIS (Wong e Meyer, 1993; Macmillan e Pierce, 1994; Caliper Corporation, 1996; MacDonald, 1996).

¹ ciência que se ocupa com o desenvolvimento de modelos matemáticos de decisão

As técnicas de optimização em GIS provaram ser ferramentas úteis em aplicações de gestão e planeamento de muitos recursos humanos e ambientais (Amjomani e Saberi, 1992; Campbell et al., 1992; Chuvieco, 1993; Djokic e Maidment, 1993; Ralston, 1994; Herzfeld e Merriam, 1995; Begur et al., 1997; Camm e tal., 1997). A programação linear, bem como as técnicas de optimização são ferramentas flexíveis para gerar vários cenários de tomadas de decisão e para análise de relações complexas entre variáveis de decisão e restrições (Arthur e Nalle, 1997). Não obstante, alguns autores argumentam que existem limitações operacionais no recurso a modelos de optimização para análise de decisão espacial em ambiente GIS (Openshaw e Whitehead, 1985; Eastman, 1993). As restrições estão relacionadas com o tamanho máximo do problema que se tenta resolver e a complexidade da linguagem de programação matemática. Eastman (1993) argumenta que o volume de dados associados com aplicações GIS *raster* (onde é considerado que cada célula é uma alternativa) impõe uma restrição severa no tamanho do problema de decisão espacial. Além disso, a complexidade da programação matemática torna esta ferramenta inacessível a muitos utilizadores. Porém, podemos argumentar que os desenvolvimentos recentes em termos de algoritmos eficientes e *software* para resolução de problemas de optimização eliminam, em grande parte, essas restrições. Actualmente, é possível controlar problemas complexos de optimização com uma simples folha de cálculo. Por exemplo, o CPLEX não tem limitações em termos de tamanho do problema e o Extended LINDO (*Linear Interactive Discrete Optimization*) resolve problemas com 32000 restrições e 100000 variáveis (LINDO Systems, Inc., 1994). Embora actualmente a contribuição dos GIS's para técnicas de optimização seja em grande parte um método para recolha de dados e visualização de resultados, as duas tecnologias podem ser integradas proporcionando uma ferramenta poderosa de suporte à decisão espacial.

Simulação

Num sentido lato, simulação é uma metodologia para realização de experiências usando um modelo do mundo real (Rubinstein, 1981; Mather, 1991; Englund, 1993). A principal diferença entre optimização e simulação reside no ponto de partida. Os procedimentos de optimização começam por definir os objectivos do sistema e especificar as acções necessárias para os atingir. Estabelecidas as condições ideais, é analisada a vizinhança dos pontos óptimos para determinar o efeito das variações no sistema. Por sua vez, a modelação de uma simulação inicia-se com as acções e estudos dos seus efeitos sobre os objectivos globais do sistema, testando políticas diferentes sob várias condições externas. A simulação é uma abordagem exploratória para problemas de decisão, que reproduz um processo ou obtém uma amostra de

vários resultados possíveis. Os componentes de um sistema em simulação são definidos matematicamente e relacionam-se uns com os outros através de relações funcionais. O resultado é uma descrição matemática do processo de decisão completo. O modelo é resolvido repetidamente usando diferentes parâmetros e variáveis de decisão, gerando-se assim um conjunto de soluções para o problema, da qual se escolhe a "melhor".

Dado que uma simulação é baseada num modelo matemático, podemos identificar duas classificações: estática vs dinâmica e determinística vs estocástica (Rubinstein, 1981).

Lau (1996) apresenta recursos de simulação espacial na Internet, incluindo um estudo de simulação baseado em GIS. Os sistemas de simulação espacial disponíveis são aplicações de domínio específico em lugar de ambientes de desenvolvimento genérico (Lau, 1996). Os sistemas ARC/INFO e GRASS são provavelmente os mais utilizados para integração com modelos de simulação (Openshaw et al., 1991; Gao et al., 1993; Coleman et al., 1994).

2.3.4. Saída de dados

Alguns sistemas GIS suportam diversos tipos de traçadores gráficos, impressoras, monitores, assim como dispositivos de saída multimédia (Cassetari, 1993). Por exemplo, o *viewer* do sistema IDRISI para Windows possui capacidade para animações, vídeo e áudio.

Em geral, os tipos de saída podem ser classificados em quatro categorias: texto (tabelas, listagens, entre outras), gráfica (cartografia, gráficos, diagramas, entre outras), dados digitais (armazenados em discos ou *tapes*, ou transferidos por rede) e outras, tais como som e vídeo (Malczewski, 1999).

2.4. Algumas limitações dos SIG's

Apesar das enormes potencialidades que os GIS's apresentam para a resolução de problemas que envolvam fenómenos com localização espacial, subsistem alguns inconvenientes na sua utilização. Raper e Rhind (1990) (Aangeenbrug, 1991) apontam fundamentalmente dois: os dicionários de comandos da maior parte dos suportes lógicos são complexos, o que leva a cometerem-se erros com facilidade; e muitos GIS's requerem da parte dos utilizadores um vasto conhecimento dos conceitos e operações de análise espacial para a utilização correcta da estrutura de comandos e a sequência de operações

necessária, mesmo em tarefas simples e comuns. Infelizmente, não existe ainda literatura que aborde globalmente os métodos de análise espacial que possam ser considerados relevantes e apropriados para GIS.

Nos últimos anos tem-se notado uma necessidade cada vez maior no recurso a análises de séries temporais de dados, por exemplo, de fenómenos ambientais. O que é certo, e que, de alguma forma, justifica a realização deste trabalho: é que os sistemas de maior divulgação e utilização no mercado não estão suficientemente preparados para o manuseamento de informação de ordem temporal (Aangeenbrug, 1991). Muito embora existam já sistemas computadorizados para a recolha e tratamento de, por exemplo, dados meteorológicos, dados relativos a fenómenos hidrológicos, dados estes que necessariamente se reportam a várias épocas, estes sistemas não são verdadeiros GIS's.

Mas, ainda no respeitante às insuficiências dos GIS's, não se pode deixar de referir uma outra, apontada por P. J. Densham (1991). Este tipo de sistemas ainda não suporta adequadamente as tomadas de decisão, porque não dispõe de capacidades de modelação analítica e não permite variações, quer no contexto, quer no processo de tomada de decisão. O referido autor aponta como resposta para esta limitação o desenvolvimento de sistemas espaciais de apoio à decisão, concebidos explicitamente para fazerem face a problemas complexos de natureza espacial.

R. T. Aangeenbrug (1991), assim como Raper e Bundock (1994), acrescentam ainda que, face à escassez de literatura e à falta de modelos claros de GIS's, nenhuma das actuais interfaces é ainda suficientemente amigável para os utilizadores, especialmente para aqueles com uma experiência limitada neste tipo de sistemas. Apesar de nos últimos anos se terem vindo a operar alguns melhoramentos com o desenvolvimento de novas interfaces, muito mais atractivas em termos visuais que as anteriores interfaces de introdução de comandos por teclado, estas continuam a enfermar de uma série de problemas.

Por fim, refira-se ainda que, a aceitação e o uso efectivo dos GIS's ainda muito limitados, quer por parte de entidades privadas, mas sobretudo por parte de departamentos públicos, podem explicar-se pelos elevados investimentos iniciais, em equipamento, suportes lógicos e na recolha dos primeiros dados, e pela dificuldade do recrutamento e formação de pessoal técnico especializado. Além destes dois aspectos, acrescenta-se ainda o facto de existir pouca divulgação de projectos menos bem sucedidos (Aangeenbrug, 1991). O exame destes últimos, talvez mais importante do que os primeiros, permitiria a avaliação de eventuais erros cometidos e recolher alguns ensinamentos.

2.5. Sumário

Para o desenvolvimento de projectos com Sistemas de Informação Geográfica é essencial uma percepção das suas potencialidades e modo de funcionamento. Por conseguinte, optou-se por uma abordagem genérica dos vários aspectos relacionados.

Após uma contextualização e posterior definição de um GIS que, embora não formal, sintetizou a discussão e debate verificada entre os diferentes autores, apresentaram-se, resumidamente, os principais componentes que descrevem um GIS.

Seguidamente, descreveram-se as principais características funcionais em termos de entrada, armazenamento e organização, manipulação e análise, e saída de dados. Realçou-se em especial as funções de análise espacial e manipulação de dados por se revelarem essenciais para a obtenção de informação útil.

Por fim, enumeraram-se algumas das limitações dos GIS's, reforçando-se a resolução de problemas que envolvam fenómenos com localização espacial e análises de séries temporais de dados.

3. Consumos em água de rega

Os modelos de simulação do balanço hídrico do solo em regadio constituem auxiliares importantes na avaliação das práticas de rega. As decisões do regante quanto à dotação e oportunidade de rega ou método de aplicação, podem ser avaliadas conhecendo os seus efeitos relativos à eficiência de utilização de água pela cultura, às profundidades de extracção radical, à utilização de água armazenada no solo, às transferências de água para fora da zona de enraizamento, com arrastamento de nutrientes, ou à ascensão capilar (R.M.C., 1991).

Na realização do trabalho a que respeita esta dissertação foi necessário implementar um método que permitisse a determinação da reserva de água no solo para a cultura da vinha e, para períodos mensais e diários. O modelo adoptado é de interesse inequívoco, como o demonstra o facto de ser recomendado por um órgão internacional idóneo. Baseia-se no balanço hídrico do solo efectuado segundo a metodologia apresentada por Doorenbos e Pruitt (1977), que considera o solo como um reservatório com determinado volume de água disponível para as plantas e cujo nível está relacionado com o crescimento e produção da cultura (Doorenbos e Pruitt, 1977; Teixeira, 1991; FAO, 2000).

Como se verá nas secções segundas, esta metodologia tem por base parâmetros meteorológicos e agronómicos. Neste trabalho e relativamente aos parâmetros meteorológicos são considerados dois tipos de registos, Mensais e Diários. Os registos mensais utilizados correspondem a uma série histórica de 30 anos, compreendendo, para determinação da reserva de água no solo para a cultura da vinha, os seguintes elementos:

- temperatura - média mensal dos máximos diários, média mensal dos mínimos diários e média mensal da temperatura média do dia,
- humidade relativa - média mensal dos máximos diários e média mensal dos mínimos diários,
- precipitação total,
- insolação total,
- velocidade do vento média mensal.

Os registos diários compreendem valores representativos do dia que são determinados a partir dos respectivos registos horários, nomeadamente: temperatura, humidade relativa, insolação, velocidade do vento e precipitação.

As necessidades em água para rega ao nível do campo representa o volume e a frequência da aplicação de água necessárias para compensar os défices de água no solo durante o ciclo da cultura. Estas necessidades são determinadas a partir da evapotranspiração, deduzidas as entradas devidas à precipitação, às contribuições do lençol freático, entre outras, efectuando um balanço hídrico do solo para o período em causa.

3.1. Balanço de água no solo

Nesta secção é apresentada a formulação teórica do modelo recomendado e publicado pela *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO) e que resulta das conclusões e recomendações de um painel de especialista organizado em Maio de 1990 (FAO, 2000).

3.1.1. Equação geral do balanço

A equação geral do balanço hídrico do solo traduz a variação do armazenamento de água no volume de solo explorado pelo sistema radicular ΔS num período de tempo Δt . Esta variação é igual à diferença entre as entradas (precipitação, rega e contribuição do nível freático) e as saídas (evapotranspiração da cultura, percolação profunda e escoamento superficial) de água:

$$\Delta S = \left[(Pt + Dr + Ac) - (Es + D + ET) \right] \Delta t \quad (3.1)$$

em que,

$$\Delta S = S(t_i) - S(t_{i-1}) \quad (3.2)$$

e onde,

- ΔS variação do armazenamento de água no solo (L^3);
- $S(t_i)$ armazenamento de água no solo no final do período Δt (T);
- $S(t_{i-1})$ armazenamento de água no solo no início do período Δt (T);
- P_t precipitação total (L^3/T);
- Dr volume de água total aplicada pela rega (L^3/T);
- Ac contributo do nível freático (L^3/T);
- Es escoamento superficial (L^3/T);
- D drenagem profunda (L^3/T);
- ET evapotranspiração do solo (L^3/T); e
- Δt período de tempo considerado (T).

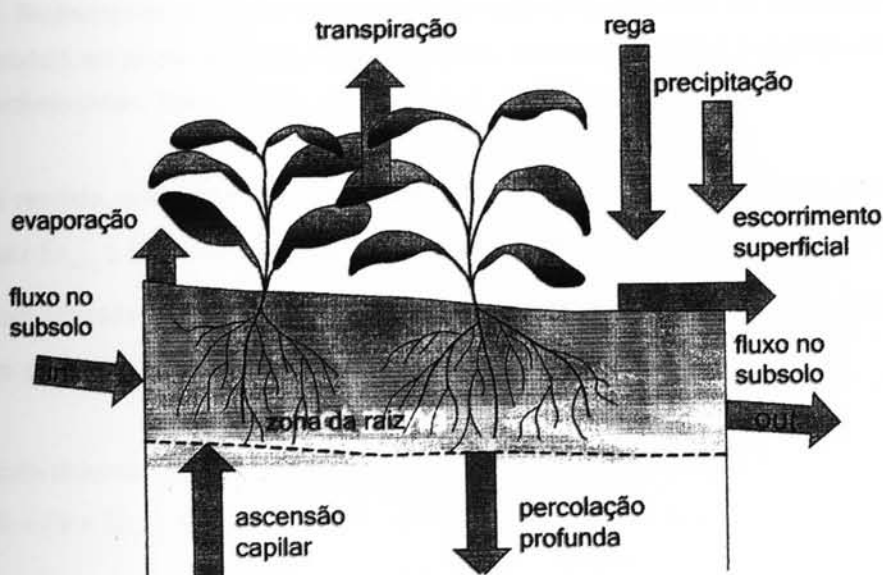


Figura 3.1 - Balanço de água no solo (FAO, 2000).

A periodicidade considerada no estabelecimento de um balanço hídrico é de grande importância. Por conseguinte, períodos demasiado longos podem disfarçar os pequenos períodos de carência hídrica. Efectivamente, se num balanço hídrico utilizarmos valores mensais, poder-se-á constatar que a precipitação efectiva é suficiente para satisfazer as necessidades hídricas, mas como as precipitações não são repartidas uniformemente pelo mês, poder-se-ão verificar pequenos períodos de défice de água sem que eles sejam detectados pelo balanço mensal.

3.1.2. Componentes do balanço hídrico do solo

Nas secções seguintes são analisadas as componentes, da equação do balanço hídrico do solo que contribuem para a variação do armazenamento de água no volume de solo explorado pelo sistema radicular: precipitação, rega, contribuição do nível freático e evapotranspiração da cultura.

3.1.2.1. Precipitação

Do ponto de vista das necessidades hídricas, por precipitação efectiva (Pe) entende-se a fracção da precipitação total que atinge o solo e que contribui para satisfazer as necessidades em água. A sua estimativa é bastante difícil e depende das condições locais. Por exemplo, uma chuvada de grande intensidade, normalmente, produz escoamento elevado, e como tal a precipitação efectiva será baixa, especialmente se o terreno for inclinado. Similarmente, a queda de precipitação num solo cujo teor de humidade seja já elevado poderá ser pouco efectiva. Contrariamente, chuvas frequentes e suaves podem ser 100% efectivas (Allen, 1998).

Na verdade, uma parte da precipitação (Pt) não se infiltra e constitui o escoamento superficial (Es_{prec}). Do volume que se infiltra, apenas uma parte fica retida na zona radicular e pode ser utilizada pelas plantas, precipitação efectiva (Pe), a restante é perdida por drenagem profunda (D_{prec}) depois de atingida a capacidade de campo.

Assim teremos,

$$Pt = Pe + Es_{prec} + D_{prec} \quad (3.3)$$

de onde,

$$Pe = Pt - Es_{prec} - D_{prec} \quad (3.4)$$

em que,

Es_{prec} é o escoamento superficial devido a um evento pluviométrico; e

D_{prec} é a drenagem profunda devido a um evento pluviométrico.

Refira-se ainda que pode verificar-se a percolação profunda durante um grande período de tempo após se ter atingido a capacidade de campo, sempre que se rega ou ocorra precipitação.

3.1.2.2. Rega

Tal como na precipitação, também no caso da rega nem toda a água aplicada é utilizada pelas plantas, uma parte é perdida por escoamento superficial (Es_{rega}) e por drenagem (D_{rega}). Assim, o volume de água total aplicado, também denominado por dotação real de rega (Dr), pode ser determinado por:

$$Dr = Du + D_{rega} + Es_{rega} \quad (3.5)$$

donde,

$$Du = Dr - D_{rega} - Es_{rega} \quad (3.6)$$

em que,

- Du é a fracção de água aplicada através da rega que é utilizada pela planta, também designada por dotação útil;
- D_{rega} as perdas por drenagem profunda devidas á rega; e
- Es_{rega} o escoamento superficial devido à rega.

3.1.2.3. Contribuição do lençol freático

A ascensão capilar da água (Ac) para as camadas superiores do solo, na presença de uma toalha freática suficientemente próxima da superfície, depende das características estruturais e texturais do solo e, de um modo geral, varia na razão inversa do volume de água nele retida. O seu valor máximo para um determinado solo será, teoricamente a ascensão capilar que se verifica quando o teor de humidade do solo iguala o coeficiente de emurchecimento permanente, pelo que é designado potencial de ascensão capilar, G (Teixeira, 1991).

Como se disse anteriormente, a ascensão capilar na presença da toalha freática depende também da reserva de água no solo na zona explorada pelo sistema radicular (S). Se nesta zona o teor de humidade for elevado, o gradiente de carga hidráulica entre ela e o lençol freático não é suficiente para que se estabeleça ascensão capilar. Estes movimentos ascendentes de água no solo só se verificam quando este teor de humidade for relativamente baixo, desde que as restantes condições o permitam, ou seja, exista elevada condutividade hidráulica do solo no nível freático próximo da zona explorada pelas raízes.

Pelas razões apontadas, o método utilizado para a determinação da Ac considera que, quando a planta se encontra em conforto hídrico, ou seja, quando a reserva de água no solo é superior ao limite de rendimento óptimo (LRO), o lençol freático, ainda que próximo da superfície, não contribui para a satisfação das necessidades hídricas das plantas. Pelo contrário, quando a planta se encontra em stresse, ou seja, quando a reserva de água no solo é inferior ao LRO , haverá contributo do nível freático desde que as restantes condições de que depende o permitam.

Assim, a determinação do contributo do nível freático para as necessidades em água das plantas é feita através de:

$$Ac = G \left(1 - \frac{S}{S_{LRO}} \right) \text{ para stresse hídrico} \quad (3.7)$$

e

$$Ac = 0 \text{ para conforto hídrico.} \quad (3.8)$$

em que,

S_{LRO} é a reserva de água no solo para limite de rendimento óptimo.

3.1.2.4. Evapotranspiração cultural

A evapotranspiração (ET) é a combinação de dois processos separados de perda de água de uma superfície vegetal. Um a partir da superfície do solo por evaporação (E), e outro a partir da canóia¹ por transpiração (T). Por conseguinte, a ET é influenciada por factores climáticos, características da cultura, condições ambientais e de manejo da cultura.

¹ Andar superior da estrutura vegetal que constitui a cultura (ramos e folhas).

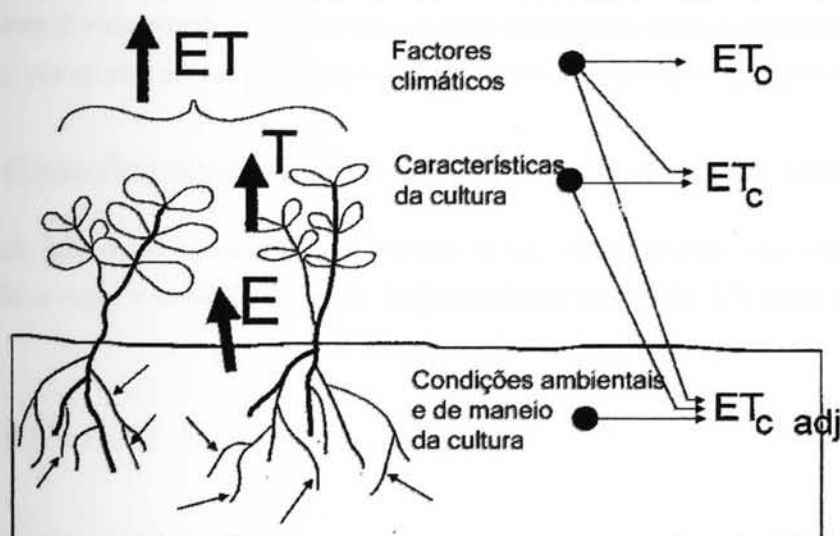


Figura 3.2 - Factores que afectam a evapotranspiração (FAO, 2000).

Quando uma cultura cresce em excelentes condições agronómicas, livre de pragas e doenças, em óptimas condições de elevada fertilidade do solo, e sem quaisquer restrições de abastecimento em água, a transferência da água para a atmosfera por evapotranspiração é máxima. Nestas condições, designa-se por **evapotranspiração em condições standardizadas** (ET_c) ou **evapotranspiração máxima** (ET_{max}).

Em algumas situações, a evapotranspiração ocorre em condições não ideais para o crescimento das plantas, como sejam a presença de pragas ou doenças, a salinidade e baixa fertilidade do solo, e falta de água. Isto resulta num menor crescimento e densidade, e consequentemente na redução da evapotranspiração. Nestas condições, a ET , designada de **evapotranspiração em condições não standardizadas** ($ET_{c\ adj}$), ocorre a uma taxa inferior à ET_c .

Considerando apenas como factor limitante o grau de abastecimento em água, a evapotranspiração cultural será determinada por:

$$ET = ET_c \text{ para conforto hídrico} \quad (3.9)$$

e

$$ET = ET_{c\ adj} < ET_c \text{ para stresse.} \quad (3.10)$$

Devido à dependência multifactorial da evapotranspiração, os métodos de determinação directa são de difícil concretização pela exigência em instrumentação e

conhecimento técnico-científico, não sendo por isso apropriados para avaliações de rotina. No entanto, são de vital importância para a validação dos métodos de estimação da ET .

3.1.3. Equações simplificadas do balanço de água no solo

Tendo em conta o referido na secção 3.1.2, relativamente aos componentes precipitação e rega, a equação geral de balanço hídrico (equação 3.1) toma a seguinte forma:

$$\Delta S = (Pe + Du + Ac - ET) \Delta t \quad (3.11)$$

Como foi referido anteriormente, os componentes do balanço ET e Ac são dependentes de vários factores, dos quais se destacaram as condições hídricas. Assim, poder-se-á, para cada uma dessas condições, deduzir uma equação de balanço, isto é:

- Em condições de conforto hídrico, substituindo (3.8) e (3.9) em (3.11), obtemos

$$\Delta S = (Pe + Du - ET_c) \Delta t \quad (3.12)$$

- Em situação de carência hídrica, substituindo (3.7) e (3.10) em (3.11), resulta

$$\Delta S = \left(Pe + Du + G \left(1 - \frac{S}{S_{LRO}} \right) - ET_{c\ adj} \right) \Delta t \quad (3.13)$$

A determinação das necessidades em água para rega pode ser efectuada para fins diferentes:

□ Previsão dos consumos

Cujo principal objectivo é a determinação dos consumos anuais e em período de ponta destinada ao dimensionamento de infra-estruturas de armazenamento e distribuição de água. Para o efeito, recorre-se a séries hidrológicas históricas com pelo menos 30 anos. Habitualmente realizada em períodos mensais.

□ Gestão da rega

Tem como objectivo a determinação, tão exacta quanto possível, da altura e quantidade de água a aplicar em função dos critérios adoptados. Para esta análise deve recorrer-se a séries de registos diários.

Em função do objectivo a que se destina, a equação de balanço de água no solo pode adoptar diferentes formas:

Previsão

O objectivo deste balanço é o determinar a quantidade de água a aplicar com a rega que permita colmatar o défice de água de modo a manter a evapotranspiração no seu nível máximo, ou seja, para manter as plantas em conforto hídrico. Neste caso, não existe a preocupação de determinar a dotação de cada rega, nem sequer o momento de a efectuar.

Os volumes de água a aplicar através da rega são determinados considerando que a variação do armazenamento de água no solo no período de tempo Δt é nulo, ou seja, $\Delta S = 0$. Nestas condições, para um período de cálculo mensal ($\Delta t = 1$ mês), a equação de balanço de água no solo (equação 3.12) apresenta a seguinte forma:

$$Du = ET_c - Pe \quad (3.14)$$

Gestão de rega

Neste caso, interessa determinar com exactidão o momento de realização de uma rega, bem como a quantidade de água que deve ser aplicada (Du). Por esta razão, é necessário que no final de cada período de tempo seja possível conhecer o armazenamento de água no solo, $S(t_i)$, para, por comparação com os critérios de gestão previamente estabelecidos, ser avaliada a necessidade ou não de regar nesse instante, e no caso de o ser, estimar a quantidade de água a aplicar.

Assim, para este objectivo, a equação geral de balanço será:

- Em caso de períodos de conforto hídrico:

$$S(t_i) = S(t_{i-1}) + (Pe + Du - ET_c) \Delta t \quad (3.15)$$

- Por sua vez, para períodos de carência hídrica:

$$S(t_i) = S(t_{i-1}) + \left(Pe + Du + G \left(1 - \frac{S(t_{i-1})}{S_{LRO}} \right) - ET_{c\ adj} \right) \Delta t \quad (3.16)$$

3.1.4. Aplicabilidade ao Cálculo de Necessidades de Rega

Na elaboração do trabalho a que esta dissertação se refere, parece ser adequado utilizar a equação 3.14 para determinação das necessidades em água de rega relativamente aos registos mensais da série histórica analisada e as equações 3.15 e 3.16 para a determinação da reserva de água no solo ao longo do ciclo vegetativo da cultura da vinha.

3.2. Precipitação efectiva

A precipitação efectiva (Pe) é a parte da precipitação total que contribui para satisfação das necessidades hídricas das culturas. Efectivamente, as perdas de precipitação que se verificam por escoamento superficial e percolação², para além da espessura do solo explorada pelo sistema radicular, não contribuem para compensar as transferências de água para a atmosfera por evapotranspiração. A altura (volume) de precipitação efectiva retida no solo durante um determinado período depende da frequência, duração e intensidade da precipitação, das condições da superfície do solo e da capacidade de armazenamento disponível no momento da precipitação (Jensen, 1989).

A capacidade de armazenamento do solo para a água no momento da precipitação depende da espessura de solo explorado pelo sistema radicular, das características hidrodinâmicas do solo, do tempo decorrido desde o último evento pluviométrico, e da taxa de extracção de água através das raízes das plantas que corresponde à evapotranspiração. Geralmente, a parte efectiva da precipitação total é tanto mais elevada quanto maior é a evapotranspiração (ET), e consequentemente, mais intensa a extracção radicular, e maior a capacidade de armazenamento do solo.

Para séries históricas, a precipitação efectiva pode ser estimada usando modelos que simulam o balanço diário de água no solo, incluindo a estimação do escoamento superficial, da evaporação do solo, da drenagem, e da relação solo-água-planta. Na ausência destes modelos a precipitação efectiva pode ser estimada através da equação proposta por USDA-SCS (USDA, 1970).

$$Pe = f(A) \times (1.25 Pt^{0.824} - 2.93) \times 10^{0.000955 ET} \quad (3.17)$$

onde,

Pe precipitação efectiva (mm/mês);

² movimento lento da água do subsolo

- P_t precipitação total (mm/mês);
 ET evapotranspiração da cultura (mm/mês);
 $f(A)$ coeficiente de correcção da Pe para altura de depleção³ da água no solo (A) diferente de 75 mm, determinado por:

$$f(A) = 0.53 + 0.0116 A - 8.94 \times 10^{-5} A^2 + 2.32 \times 10^{-7} A^3 \quad (3.18)$$

Para análise das séries hidrológicas históricas, considerou-se a altura de depleção da água no solo, antes de cada precipitação, igual à reserva facilmente utilizável (RFU), a qual corresponde ao volume de água retido no solo que é susceptível de ser utilizada pelas plantas sem perdas significativas de produção:

$$A = RFU = DGP \times RU \quad (3.19)$$

onde,

DGP défice de gestão permissível.

RU reserva utilizável (mm), obtida da seguinte forma:

$$RU = 10 \times (\theta_{cc} - \theta_{ce}) \times \Delta Z \quad (3.20)$$

em que:

θ_{cc} teor de água no solo à capacidade de campo (%v/v);

θ_{ce} teor de humidade no solo ao coeficiente de emurchecimento (%v/v);

ΔZ espessura de solo explorada pelo sistema radicular (m).

3.2.1. Aplicabilidade ao Cálculo de Necessidades de Rega

Na determinação das necessidades em água de rega relativas aos registos mensais (Equação 3.14) da série histórica considerada, torna-se necessário estimar a precipitação efectiva através da equação 3.17 por não existirem os registos diários correspondentes. No trabalho desenvolvido, dada a inexistência de cartografia de solo publicada para a região, optou-se por efectuar a previsão para os três tipos de solo característicos da região em estudo (solo com textura arenosa, franca e argilo-limosa). Além disso, para cada tipo de solo foram considerados três níveis de espessura (1m; 1,4m e 1,8m). Relativamente aos coeficientes de emurchecimento, capacidade de campo e défice de gestão permissíveis

³ diminuição de um líquido num órgão

foram usados os valores tabelados e recomendados pela FAO para a cultura da vinha e para os solos em estudo.

Relativamente aos registos diários, embora se possa recorrer a modelos hidrológicos complexos, que nos permitiriam determinar com precisão a precipitação efectiva, a utilização destes, para além de aumentar a complexidade da ferramenta, exige o conhecimento de parâmetros caracterizadores da topografia das parcelas e características hidrodinâmicas do solo que, a uma escala regional, como se pretende, são extremamente difíceis de obter. Por essa razão, sem grande prejuízo para a precisão do modelo, optou-se por utilizar os valores de precipitação total diária.

3.3. Evapotranspiração cultural

Dadas as dificuldades na medição directa da taxa de evapotranspiração de uma cultura, pelas razões já referidas, e por não serem conhecidas as resistências aerodinâmicas e da canópi, bem como o albedo (ver secção 3.5.3) de grande parte das culturas, e especificamente da vinha, a determinação da evapotranspiração cultural em condições standardizadas (ET_c) recorre à designada aproximação com coeficientes culturais. Nesta aproximação, a ET_c é calculada pelo produto entre a evapotranspiração da cultura de referência (ET_0) e os coeficientes culturais (K_c), isto é,

$$ET_c = ET_0 \times K_c \quad (3.21)$$

onde,

ET_0 evapotranspiração de uma superfície extensa de relva com uma altura uniforme de 0.12 m, uma resistência da superfície de 70 s/m e albedo de 0.23 m, bem abastecida de água que cresce activamente cobrindo completamente o solo. É um índice da demanda evaporativa da atmosfera.

O coeficiente cultural K_c é basicamente a rácio entre a ET_c e a ET_0 , e integra os efeitos das quatro principais características que distinguem a cultura em estudo da de referência. Estas características são:

- Altura da cultura, que influencia a resistência aerodinâmica (r_a) e a transferência de vapor da cultura para a atmosfera.

- ❑ Albedo da superfície planta-solo que influencia a radiação solar líquida (R_n) - a fonte primária de troca de energia no processo de evapotranspiração.
- ❑ Resistência da cultura para a transferência de vapor que influencia a resistência da superfície (r_s).
- ❑ Evaporação do solo, especialmente o que está exposto.

Os coeficientes culturais são assim a relação entre a evapotranspiração de uma determinada cultura e a evapotranspiração de uma superfície relvada de referência. Esta relação pode ser integrada através de um coeficiente único - **aproximação simples** - ou através de dois coeficientes que compreendem separadamente as relações entre a evaporação e a transpiração das duas superfícies - **aproximação dupla**.

A selecção do tipo de aproximação a utilizar depende do objectivo do cálculo, da precisão requerida, dos dados meteorológicos disponíveis e do período de tempo.

Como a evaporação do solo pode oscilar diariamente como resultado da precipitação ou rega, o coeficiente cultural simples expressa apenas a média (em dias) dos efeitos da evapotranspiração cultural. Por conseguinte, esta aproximação deve ser usada para calcular a ET_c para períodos semanais ou mais longos, embora possa ser utilizado para cálculos diários.

Por sua vez, a aproximação dupla é mais adequada para gestão (calendarização) da rega em tempo real, cálculo do balanço de água no solo e estudos em que os efeitos das variações diárias no solo têm impacto no coeficiente cultural diário.

Na aproximação simples recorreremos à equação (3.21). Por sua vez, na aproximação dupla recorre-se à equação seguinte:

$$ET_c = (K_{cb} + K_e) ET_0 \quad (3.22)$$

em que,

- K_{cb} coeficiente cultural de base, referente à componente de transpiração; e
- K_e coeficiente de evaporação referente à componente evaporação do solo.

3.3.1. Aproximação simples - Coeficientes culturais

Os coeficientes culturais são coeficientes adimensionais específicos para uma dada cultura, num dado momento do seu estágio de desenvolvimento vegetativo e para um determinado teor de humidade do solo.

Com efeito, os factores que influenciam o valor do coeficiente cultural são:

- ❑ as características da cultura;
- ❑ a data de início do ciclo cultural e da sua fase de desenvolvimento;
- ❑ as condições climáticas, em particular no início do crescimento; e
- ❑ as condições de humidade do solo, principalmente nas fases em que o grau de cobertura pela cultura é ainda baixo.

Assim, a estimação destes coeficientes deverá ter em consideração todas estas dependências.

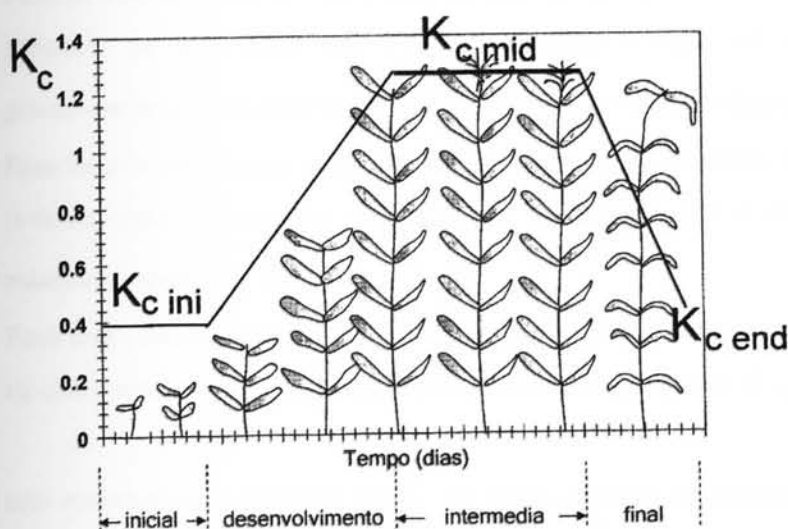


Figura 3.3 - Curva de coeficientes culturais (FAO, 2000).

A variação dos valores dos coeficientes culturais, K_c , ao longo do ciclo de desenvolvimento de uma cultura é normalmente apresentada sob a forma de uma curva - Curva de K_c . Da observação desta curva verifica-se que numa fase inicial do seu ciclo de desenvolvimento, caracterizada por uma ainda fraca cobertura do solo pela cultura, o valor de K_c é baixo e aproximadamente constante, essencialmente devido à componente evaporação. A esta fase inicial segue-se uma outra que se caracteriza pelo crescimento do

valor de K_c , resultado de um forte e rápido desenvolvimento da superfície foliar e em consequência do aumento significativo da componente transpiração. Após esta fase de forte crescimento vegetativo, segue-se um período de grande consumo de água traduzido por um valor de K_c elevado e aproximadamente constante. Por fim, o ciclo da grande maioria das culturas caracteriza-se por uma perda mais ou menos intensa da superfície foliar, o que se traduz num decrescimento da evapotranspiração e consequentemente do respectivo coeficiente cultural.

Perante esta evolução, para efeito da estimação dos valores de K_c em diferentes momentos do desenvolvimento de uma cultura, Doorembos e Pruitt (1977), apresentam uma metodologia na qual o ciclo cultural é dividido em quatro fases:

- a) **Fase inicial** - abrange as fases de germinação e crescimento primário, enquanto a cobertura do solo pela folhagem é inferior a 100%, ao qual corresponde um valor de K_c constante.
- b) **Fase de desenvolvimento** - com início no final da fase anterior até se atingir uma cobertura do solo além dos 70-80%, na qual o valor de K_c aumenta gradualmente entre o valor da fase inicial ($K_{c\ ini}$) e o valor da fase seguinte.
- c) **Fase intermédia** - desde o fim do estágio anterior até ao início da maturação (indicado pela mudança de coloração das folhas), na qual o valor de K_c é máximo e constante - $K_{c\ mid}$.
- d) **Fase final** - desde o fim da fase anterior até à maturação completa ou colheita, na qual o valor de K_c diminui gradualmente até atingir o valor $K_{c\ end}$.

Com esta metodologia a variação do K_c ao longo do ciclo de desenvolvimento de uma cultura poderá ser definida conhecido o início do ciclo cultural, a duração de cada uma destas fases, e os valores de $K_{c\ ini}$, $K_{c\ mid}$ e $K_{c\ end}$. Na ausência de valores estabelecidos localmente dever-se-á recorrer a valores tabelados. Não esquecendo que, sendo os coeficientes culturais a relação entre a evapotranspiração de uma cultura e da cultura de referência, são específicos da metodologia utilizada na determinação da ET_0 .

Dado que, como se referirá adiante, na determinação da evapotranspiração de referência se recorreu à equação de Penman-Monteith, os valores de $K_{c\ ini}$, $K_{c\ mid}$ e $K_{c\ end}$

utilizados são os constantes nas tabelas publicadas no *Paper 56 - Irrigation and drainage*, da FAO.

Sendo os coeficientes culturais determinados pelas condições climáticas, os valores tabelados reflectem também as condições climáticas padrão (climas subhúmidos - humidade relativa mínima $\cong 45\%$ e velocidade do vento medida a 2 m de altura do solo $\cong 2 \text{ m/s}$) para as quais foram determinados. Assim sendo, em condições climáticas diferentes das padrão, dever-se-á proceder ao seu ajustamento através das equações:

$$K_{c \text{ mid}} = K_{c \text{ mid (tabelado)}} + [0,04(u_2 - 2) - 0,004(HR_{\min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0,3} \quad (3.23)$$

$$K_{c \text{ end}} = K_{c \text{ end (tabelado)}} + [0,04(u_2 - 2) - 0,004(HR_{\min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0,3} \quad (3.24)$$

em que:

u_2 valor corrigido da velocidade média do vento (m/s);

$HR_{\min}$ humidade relativa mínima (%);

h altura máxima da cultura (m).

Após o ajustamento às condições climáticas procede-se então à construção da curva de K_c a partir da qual são obtidos os valores diários ou os valores médios referentes ao período de cálculo.

3.3.2. Evapotranspiração cultural em condições de stresse hídrico

As forças que actuam sobre a água do solo contribuem para a diminuição do seu potencial de energia e, consequentemente, comandam a extracção por parte das raízes da planta. Quando o solo está húmido, a água tem um elevado potencial de energia sendo relativamente fácil a extracção radicular. Por sua vez, em solos secos, a água tem uma baixa energia potencial e é fortemente absorvida pela matriz do solo sendo por isso extraída mais dificilmente pela cultura.

Quando a energia potencial da água no solo desce abaixo do valor limiar, diz-se que a cultura está em stresse hídrico. Os efeitos do stresse de água nos níveis de evapotranspiração são descritos, no método de aproximação dupla (Equação 3.22), pelo produto entre o coeficiente cultural basal (K_{cb}) e o coeficiente de stresse hídrico (K_s):

$$ET_{c\ adj} = (K_s K_{cb} + K_e) ET_0 \quad (3.25)$$

Em condições de stresse hídrico, $0 < K_s < 1$, enquanto que em caso de conforto hídrico, $K_s = 1$.

K_s descreve o efeito de stresse hídrico na transpiração da cultura. Nos casos em que se utiliza a aproximação simples (Equação 3.21), o efeito de stresse hídrico é incorporado em K_c :

$$ET_{c\ adj} = K_s K_c ET_0 \quad (3.26)$$

Porque os coeficientes de stresse hídrico apenas têm impactos na transpiração cultural, a aplicação de K_s , usando a Equação (3.25), é geralmente mais rigorosa do que a Equação (3.26). Porém, em situações onde a evaporação a partir do solo não é um componente grande da ET_c , a utilização da Equação (3.26) permitirá resultados razoáveis.

Coeficiente de stresse hídrico (K_s)

Os efeitos do stresse hídrico na evapotranspiração cultural são descritos reduzindo o valor pelo coeficiente cultural, isto é, multiplicando o coeficiente cultural pelo coeficiente de stresse hídrico, K_s (Equações 3.25 e 3.26), compreendido entre 0 e 1.

O conteúdo de água na zona da raiz pode também ser expresso através da depleção da zona da raiz (A_r), isto é, escassez de água relativamente à capacidade de campo (TAW). Na capacidade de campo, a depleção da zona da raiz é zero ($A_r = 0$). Quando a água no solo é extraída por evapotranspiração, a depleção aumenta e o stresse é induzido quando A_r se torna igual a RAW (o conteúdo de água abaixo do limiar θ_l). Depois da depleção de zona da raiz exceder RAW , a depleção da zona da raiz aumenta bastante para limitar a evapotranspiração para valores inferiores aos valores potenciais e a evapotranspiração cultural começa a diminuir em proporção à quantidade de água que permanece na zona da raiz (Figura 3.4).

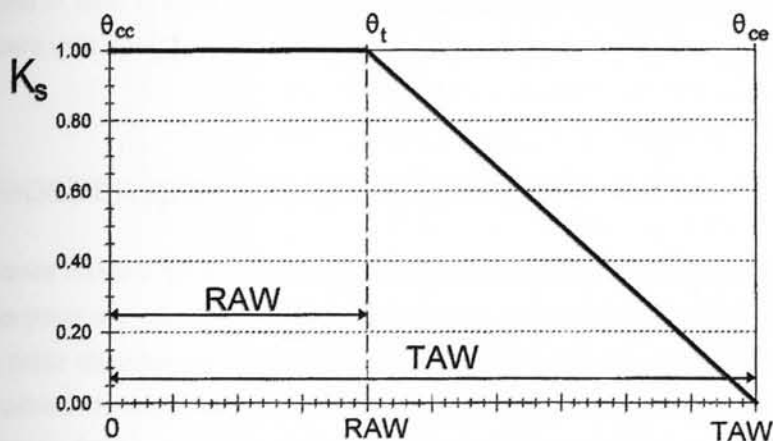


Figura 3.4 - Coeficiente stress hídrico (FAO, 2000).

Para $A_r > RAW$, K_s é dado por:

$$K_s = \frac{TAW - A_r}{TAW - RAW} = \frac{TAW - A_r}{(1 - DGP) TAW} \quad (3.27)$$

onde,

- K_s coeficiente de stress hídrico. É um coeficiente adimensional de redução dependente da água do solo disponível (0 – 1);
- A_r depleção de zona de raiz (mm);
- TAW teor armazenado de água no solo correspondente à capacidade de campo (mm); e
- DGP fração do TAW que a cultura pode extrair da zona da raiz sem sofrer stress hídrico (–).

Depois do cálculo de K_s , a evapotranspiração ajustada $ET_{c\ adj}$ é determinada através da Equação (3.25) ou (3.26), dependendo dos coeficientes usados para descrever a evapotranspiração cultural. Quando a depleção da zona de raiz é menor que RAW , $K_s = 1$.

3.3.3. Aplicabilidade ao Cálculo de Necessidades de Rega

No trabalho realizado a evapotranspiração da cultura da vinha foi calculada através da equação 3.21 porque para utilização da equação 3.22 era necessária informação sobre o sistema de condução da vinha, a existência de coberto vegetal, entre outras, que a uma

escala regional e com o cadastro da vinha existente são informações que não existem disponíveis para toda a região.

3.4. Evapotranspiração de referência

Um grande número de métodos empíricos foram desenvolvidos nos últimos 50 anos por vários cientistas e especialistas em todo o mundo para estimar a evapotranspiração de referência a partir de diferentes variáveis climáticas. Os estudos comparativos de vários métodos de cálculo da evapotranspiração de referência, publicados no *Paper 24 - Irrigation and Drainage*, da FAO, revelaram melhor desempenho do método de Penman-Monteith, modificado visto poder ser usado tanto em climas áridos como húmidos e os resultados obtidos terem sido os mais satisfatórios e com o menor erro de estimação. Contudo este modelo foi melhorado pela FAO e recomendado e publicado no Paper 56 (FAO, 2000).

3.4.1. Equação FAO Penman-Monteith

Introduzidas na equação de Penman-Monteith original, as condições específicas da superfície de relva considerada como referência, $h=12\text{cm}$ e $r_s = 70\text{ s/m}$, obtém-se a equação FAO Penman-Monteith utilizada na estimação da evapotranspiração de referência:

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 Da}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 U_2)} \quad (3.28)$$

onde,

ET_0	evapotranspiração de referência (mm/dia);
R_n	radiação líquida ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$);
G	densidade fluxo calor ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$);
T	temperatura média dia ($^{\circ}\text{C}$);
U_2	velocidade do vento a 2 metros de altura (m/s);
γ	constante psicométrica ($\text{KPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$);
Δ	declive da curva pressão vapor ($\text{KPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$); e
Da	défice tensão vapor da atmosfera (kPa).

3.4.2. Dados Meteorológicos

Os métodos de cálculo da evapotranspiração a partir de dados meteorológicos requerem o conhecimento de vários parâmetros físicos e climáticos. Alguns destes, registados directamente em estações climatológicas e outros relacionados com estes a partir dos quais são estimados através de equações mais ou menos empíricas.

Seguidamente, apresenta-se o formulário de cálculo das variáveis inerentes à equação FAO Penman-Monteith.

Pressão atmosférica

$$P = 101,3 \times \left(\frac{293 - 0,0065 \times z}{293} \right)^{5,26} \quad (3.29)$$

onde,

z altitude da estação meteorológica (m).

Constante psicométrica

$$\gamma = 0,665 \times 10^{-3} \times P \quad (3.30)$$

em que,

P pressão atmosférica (kPa).

Défice tensão vapor da atmosfera

O défice tensão vapor da atmosfera (Da) é a diferença entre a tensão vapor saturante (ea^0) e a tensão vapor actual (ea) da atmosfera, para o período de tempo pretendido, isto é,

$$Da = ea^0 - ea \quad (3.31)$$

Tensão vapor saturante da atmosfera

$$ea^0(T) = 0,6108 e^{\frac{17,27T}{T+237,3}} \quad (3.32)$$

onde,

$ea^0(T)$ tensão vapor saturante da atmosfera para a temperatura do ar

T ; e

T temperatura do ar ($^{\circ}C$).

Calculamos a tensão vapor saturante da atmosfera para as temperaturas médias máxima ($T_{\max}$) e mínima ($T_{\min}$).

Tensão vapor actual da atmosfera

A tensão vapor actual da atmosfera pode ser calculada a partir da humidade relativa. Dependendo dos dados disponíveis podemos aplicar diferentes equações.

- Para $HR_{\max}$ e $HR_{\min}$:

$$ea = \frac{ea^0(T_{\min}) \frac{HR_{\max}}{100} + ea^0(T_{\max}) \frac{HR_{\min}}{100}}{2} \quad (3.33)$$

em que,

ea tensão vapor actual da atmosfera (kPa);

$ea^0(T_{\min})$ tensão vapor saturante da atmosfera à temperatura mínima (kPa);

$ea^0(T_{\max})$ tensão vapor saturante da atmosfera à temperatura máxima (kPa);

$HR_{\max}$ humidade relativa máxima (%); e

$HR_{\min}$ humidade relativa mínima (%).

- Para $HR_{\max}$:

$$ea = ea^0(T_{\min}) \frac{HR_{\max}}{100} \quad (3.34)$$

Declive da curva tensão vapor saturante

Para o cálculo da evapotranspiração é necessário determinar o declive da curva (Δ) entre a tensão vapor saturante e a temperatura. Por conseguinte, para uma determinada temperatura T , o declive da curva é dado por:

$$\Delta = \frac{4098 \times 0,6108 e^{\frac{17,27T}{T+237,3}}}{(T+237,3)^2} \quad (3.35)$$

ou

$$\Delta = \frac{4098 e a^0(T)}{(T+237,3)^2} \quad (3.36)$$

$$\text{com } T = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \quad (3.37)$$

onde,

Δ declive da curva da pressão vapor para a temperatura T ($\text{KPa}^\circ\text{C}^{-1}$);

$T_{\max}$ temperatura média máxima ($^\circ\text{C}$); e

$T_{\min}$ temperatura média mínima ($^\circ\text{C}$).

Radiação líquida

A radiação líquida (R_n) é o balanço entre a energia absorvida, reflectida e emitida pela superfície da terra, ou a diferença entre a radiação líquida de curto e longo comprimento de onda, sendo normalmente, positiva durante o dia e negativa durante a noite. Excepto em condições extremas de altas latitudes, normalmente o seu valor total diário (24 h) é positivo.

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (3.38)$$

em que,

R_n radiação líquida ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$);

R_{nl} radiação líquida de longo comprimento de onda ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$); e

R_{ns} radiação solar líquida curto comprimento onda ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$).

Radiação que atinge o topo da atmosfera

A radiação que penetra numa superfície perpendicular aos raios solares no topo da atmosfera terrestre é designada por constante solar ($0.082 \text{ MJm}^{-2} \text{ min}^{-1}$). O valor da radiação num ponto determinado, depende do ângulo entre a direcção dos raios solares e a normal da superfície da atmosfera. Este ângulo varia durante o dia em diferentes latitudes e durante o ano. A radiação que atinge o topo da atmosfera também é chamada de radiação solar extraterrestre.

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \quad (3.39)$$

onde,

R_a radiação que atinge o topo da atmosfera ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$);

G_{sc} constante solar = $0,0820 \text{ MJ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$;

d_r distância relativa sol-terra;

ω_s sunset hour angle (rad);

φ latitude da estação meteorológica⁴;

δ declinação solar (rad),

j número do dia do ano, calculado para valores mensais; e

M número do mês.

com,

$$d_r = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (3.40)$$

$$\delta = 0,409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1,39\right) \quad (3.41)$$

$$j = \text{inteiro}(30,4M - 15) \quad (3.42)$$

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi) \tan(\delta)] \quad (3.43)$$

⁴ Converter para radianos.

Duração relativa da luz solar

A duração relativa da luz solar (n/N) depende da relação entre o número de horas de sol que se verifica num dia (n) e o número máximo de horas de radiação no topo da atmosfera (N).

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad (3.44)$$

onde ω_s - *sunset hour angle* (rad).

Radiação solar (R_s)

Da radiação que penetra a atmosfera, alguma é dispersa, reflectida ou absorvida pelos gases da atmosfera, nuvens e pelas poeiras. A que atinge um plano horizontal é referenciada como radiação solar ou radiação de curto comprimento de onda.

$$R_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a \quad (3.45)$$

onde,

R_s radiação solar ($MJ m^{-2} dia^{-1}$);

n/N duração relativa da luz solar;

R_a radiação que atinge o topo da atmosfera ($MJ m^{-2} dia^{-1}$);

a_s radiação extraterrestre que atinge a superfície do solo com o céu completamente nublado; e

$a_s + b_s$ fracção de radiação extraterrestre que atinge a superfície do solo numa situação de céu descoberto, com $a_s = 0,25$ e $b_s = 0,5$.

Radiação solar em dia céu limpo

Considerando que $a_s + b_s = 0,75$

$$R_{so} = (0,75 + 2 \times 10^{-5} z) R_a \quad (3.46)$$

onde,

R_{so}	radiação solar em dia céu limpo ($MJ m^{-2} dia^{-1}$);
z	altitude da estação meteorológica (m); e
R_a	radiação que atinge o topo da atmosfera ($MJ m^{-2} dia^{-1}$).

Radiação solar relativa

A radiação solar relativa é o quociente entre a radiação solar (R_s) e a radiação solar em dia céu limpo (R_{so}), tomando valores entre 0,33 (céu densamente coberto) e 1 (céu limpo).

Albedo

Uma quantidade considerável da radiação solar que atinge a superfície da terra é reflectida. A esta fracção da radiação que é reflectida pela superfície designa-se albedo (α), o qual possui grandes variações consoante o tipo de superfície, o ângulo de incidência e o declive do terreno. O valor do albedo para a cultura de referência é de 0,23.

Radiação solar líquida de curto comprimento onda

A radiação solar líquida de curto comprimento de onda (R_{ns}), é a fracção da radiação solar (R_s) que não é reflectida pela superfície.

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s \quad (3.47)$$

em que,

R_{ns}	radiação solar líquida curto comprimento onda ($MJ m^{-2} dia^{-1}$);
α	albedo para a cultura de referência = 0,23; e
R_s	radiação solar ($MJ m^{-2} dia^{-1}$).

Radiação líquida de longo comprimento de onda

A radiação solar absorvida pela terra é convertida em energia calorífica por vários processos incluindo a emissão de radiação. A radiação terrestre é designada por radiação de longo comprimento de onda. A radiação que tem um sentido ascendente é absorvida pela atmosfera ou perde-se no espaço. Por sua vez, a descendente provoca uma subida de

temperatura. Da diferença entre as duas radiações resulta a designada radiação líquida de longo comprimento de onda (R_{nl}), que normalmente representa uma perda de energia.

$$R_{nl} = \sigma \left(\frac{T_{\max,K}^4 + T_{\min,K}^4}{2} \right) (0,34 - 0,14\sqrt{ea}) \left(1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (3.48)$$

onde,

R_{nl} radiação líquida de longo comprimento de onda
($MJ m^{-2} dia^{-1}$);

σ constante Stefan-Boltzmann ($4.903 \times 10^{-9} MJ K^{-4} m^{-2} dia^{-1}$);

$T_{\max,K}$ temperatura média máxima em Kelvin ($K = ^\circ C + 273,16$);

$T_{\min,K}$ temperatura média mínima em Kelvin ($K = ^\circ C + 273,16$);

ea tensão vapor actual da atmosfera (kPa);

R_{so} radiação solar em dia céu limpo ($MJ m^{-2} dia^{-1}$);

R_s radiação solar ($MJ m^{-2} dia^{-1}$); e

R_s/R_{so} radiação solar relativa ($\leq 1,0$).

Densidade fluxo de calor (G)

Ao efectuar a estimativa da evapotranspiração, nos termos do balanço de energia, deve considerar-se a densidade fluxo de calor do solo, apesar de alguns autores não a incluírem devido ao seu valor mínimo quando comparada com a radiação líquida. A densidade fluxo de calor é a energia que é utilizada no aquecimento do solo.

Seguidamente apresentamos o formalismo de cálculo para períodos diários e mensais.

Períodos diários

Para períodos diários e de 10 dias os fluxos de calor para o solo são relativamente pequenos e portanto podem ser ignorados. Dai que, $G_{dia} \approx 0$.

Períodos mensais

$$G_{\text{mês},i} = 0,07 (T_{\text{mês},i+1} - T_{\text{mês},i-1}) \quad (3.49)$$

Quando o valor de $T_{\text{mês},i+1}$ é desconhecido:

$$G_{\text{mês},i} = 0,14(T_{\text{mês},i} - T_{\text{mês},i-1}) \quad (3.50)$$

onde,

G densidade fluxo de calor ($MJ m^{-2} dia^{-1}$);

$T_{\text{mês},i+1}$ temperatura média do ar do mês seguinte ($^{\circ}C$);

$T_{\text{mês},i-1}$ temperatura média do ar do mês anterior ($^{\circ}C$); e

$T_{\text{mês},i}$ temperatura média do ar do mês pretendido ($^{\circ}C$).

Velocidade do vento

A medição da velocidade do vento, é efectuada a diferentes alturas a partir da superfície do solo. Os anemómetros são colocados a alturas standardizadas, ou seja, a 10 m em meteorologia e a 2 ou 3 m em agrometeorologia. Como as características da velocidade do vento variam com vários parâmetros, entre os quais a altura de medição, é necessário estabelecer algumas regras. No cálculo da evapotranspiração considera-se que a leitura da velocidade do vento é feita a 2 m de altura da superfície pretendida.

$$u_2 = u_z \frac{4,87}{\log(67,8z - 5,42)} \quad (3.51)$$

em que,

u_2 velocidade do vento corrigida ($m s^{-1}$);

u_z velocidade do vento que consta no anuário ($m s^{-1}$); e

z altura da cabeça do anemómetro (m).

A equação anterior permite converter a velocidade do vento a uma altura de 2m.

3.5. Sumário

Neste capítulo apresentou-se a formulação teórica do modelo de simulação do balanço hídrico do solo implementado neste trabalho.

Depois de algumas considerações gerais apresentou-se a equação geral do balanço cuja análise de componentes permitiu incorporar algumas simplificações na equação geral. Em seguida, analisaram-se os componentes da equação obtida: precipitação efectiva, evapotranspiração cultural e evapotranspiração de referência.

Relativamente à precipitação efectiva, foi apresentada uma equação, proposta por USDA-SCS, para, na ausência de modelos que simulam o balanço diário de água no solo, estimar o seu valor.

Dadas as dificuldades na medição directa da taxa de evapotranspiração de uma cultura, apresentaram-se duas aproximações com recurso a coeficientes culturais:

- aproximação simples, que integra a relação entre a evapotranspiração de uma determinada cultura e a evapotranspiração de uma superfície relvada de referência, através de um coeficiente único; e
- aproximação dupla, através de dois coeficientes que compreendem separadamente às relações entre a transpiração da superfície vegetal, evaporação da água a partir e a evapotranspiração da superfície de referência.

Dado que a abordagem adoptada no trabalho a que esta dissertação se refere foi a aproximação simples, apresentou-se, para este caso, a metodologia de cálculo dos coeficientes culturais.

Por fim, foi apresentada o método de cálculo da evapotranspiração de referência segundo a equação de Penman-Montheith modificada, recomendada e publicada pela FAO no paper 56 - *Irrigation and Drainage*.

4. Inferência espacial

Os fenómenos espaciais estruturados, tal como o nome indica, são entidades que se distribuem no espaço de um modo não aleatório, isto é, com uma certa estrutura. Não obstante, a informação disponível (amostras, observações) é, na sua maioria, parcelar, discreta e normalmente escassa, o que faz com que, ao conhecimento global, esteja sempre associada uma certa ideia de incerteza.

Por conseguinte, para quantificar as características de um fenómeno espacial é necessário dispor de modelos que permitam inferir as suas grandezas no espaço não amostrado a partir da informação disponível. A interpolação e a geoestatística tornam-se assim primordiais, não só para a caracterização da distribuição espacial, mas também para a avaliação de medidas de incerteza, tendo em conta a maior ou menor variabilidade do fenómeno, a qualidade das amostras e observações, o tipo de modelo geoestatístico escolhido e o maior ou menor grau de conhecimento que se tem do fenómeno (Sousa, 1990).

Tendo-se apresentado, no capítulo anterior, a metodologia seguida para simulação do balanço hídrico do solo e dado que os parâmetros meteorológicos necessários são registos de estações meteorológicas da região e sua zona envolvente, para a sua aplicabilidade a qualquer localização da região em estudo é necessário o conhecimento de técnicas de estimação de valores a partir dos dados amostrados.

Para o efeito, nas secções seguintes, apresentam-se vários modelos de inferência espacial, classificados em dois tipos, os Modelos Deterministas e os Modelos Geoestatísticos.

Os modelos deterministas, menos utilizados por oferecerem um menor grau de confiança, baseiam-se em meras interpolações espaciais de valores conhecidos em pontos de amostragem, enquanto que os modelos geoestatísticos, muito mais abrangentes em funcionalidade, apresentam uma complexidade matemática superior.

4.1. Modelos deterministas

Os métodos deterministas, embora continuem a ter grande aplicação na cartografia de fenómenos espaciais, têm no entanto, como objectivo simplesmente a interpolação espacial dos valores amostrados, calculando um valor de uma dada grandeza no espaço a partir de uma combinação linear dos valores observados. Um aspecto comum a estes modelos respeita ao facto de terem por base critérios geométricos para determinar a influência das amostras, isto é, a proximidade dos valores observados ao ponto a estimar.

Seguidamente apresentamos alguns dos principais métodos deterministas com aplicação na cartografia: Polígonos de Influência, Triangulação e Inverso da Potência das Distâncias.

4.1.1. Método dos polígonos de influência

Neste método, o espaço é discretizado em polígonos centrados em cada amostra e cuja dimensão é determinada pela distância entre estas. Por conseguinte, todos os pontos interiores ao polígono assumem o valor da amostra do centro do polígono no qual está contido.

Generalizando, podemos afirmar que qualquer ponto do espaço tem como valor estimado o valor da amostra mais próxima, isto é, o valor da amostra do centro do polígono no qual está contido.

Pelo exposto, trata-se de um método interpolador que considera apenas o valor de uma amostra por região e, por conseguinte, só é normalmente aplicado em malhas muito densas de amostras ou em estimações de valores globais, isto é, médias ponderadas das amostras em que os ponderadores de cada amostra são proporcionais às áreas dos polígonos (Soares, 2000).

4.1.2. Método de triangulação

Como é sugerido da sua denominação, neste método, o espaço é subdividido em triângulos cujos vértices são as amostras. O valor estimado num determinado ponto do espaço corresponde à média ponderada dos valores das amostras dos vértices do triângulo que o contém. Os ponderadores são calculados de acordo com a proximidade do ponto a cada um dos vértices, recorrendo à equação do plano definido pelos valores das amostras dos vértices. A título de exemplo, um ponto P_0 de coordenadas (x, y) contido no triângulo definido pelos vértices (x_1, y_1) , (x_2, y_2) e (x_3, y_3) tem o valor $z = ax + by + c$, em que os coeficientes a , b e c são obtidos pelo sistema de equações do plano que contém P_0 :

$$ax_1 + by_1 + c = z_1$$

$$ax_2 + by_2 + c = z_2$$

$$ax_3 + by_3 + c = z_3$$

Comparativamente com o método dos polígonos de influência neste estimador local intervêm as três amostras mais próximas do ponto a estimar.

4.1.3. Método do inverso da potência das distâncias

Neste método, a influência de cada amostra no valor estimado é determinada pelo inverso da sua distância ao ponto a estimar elevada a uma potência arbitrária. Quanto maior é a potência, maior é a influência da amostra mais próxima. Em caso de potência nula o ponderador é igual para qualquer amostra. Como o expoente 2 é o mais usual, este método é geralmente conhecido por inverso do quadrado das distâncias:

$$z = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{1}{d_i^2} z_i}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{d_i^2}} \quad (4.1)$$

sendo, d_i a distância entre a amostra P_i e o ponto a estimar.

4.2. Modelos geoestatísticos

A geoestatística surgiu da necessidade de modelização de recursos geológicos, nomeadamente, a caracterização da dispersão espacial da concentração de metais em jazigos minerais e o estudo da qualidade de águas subterrâneas. No entanto, por os seus métodos serem suficientemente gerais são aplicados aos mais diversos domínios das Ciências da Terra e do Ambiente (Soares, 2000).

Etimologicamente, geoestatística significa estudo estatístico dos fenómenos naturais. Todavia, desde os trabalhos iniciais de G. Matheron no início da década de sessenta, é definida como a aplicação do formalismo das funções aleatórias ao reconhecimento e estimação de fenómenos naturais. As variáveis relacionadas com estes fenómenos dependem fortemente da localização espacial, sendo por isso denominadas variáveis regionalizadas. No entanto, esta dependência não é determinista, coexistindo dois aspectos: um aleatório, que reflecte a variação imprevisível de um ponto para outro do espaço e outro estrutural, traduzindo as correlações existentes entre as diversas localizações onde o fenómeno ocorre (Sousa, 1990).

Na verdade, o conjunto de factores que contribuem para a variação de um fenómeno no espaço é, por vezes, de tal ordem complexo que a incerteza daí resultante dificulta a sua integração num modelo físico determinista.

Por conseguinte, o corpo metodológico da geoestatística consiste basicamente num conjunto de instrumentos estatísticos que quantificam a continuidade espacial da grandeza em estudo, em:

- modelos de interpolação espacial, tendo por base a sua variabilidade estrutural
- modelos de simulação estocástica que quantificam a incerteza associada ao fenómeno espacial (Soares, 2000).

A inferência espacial assenta na definição de variáveis regionalizadas e na colocação de hipóteses restritivas que permitem definir a função de inferência, assim como na análise de continuidade espacial e na estimação geoestatística, estas últimas constituindo o ponto fulcral da metodologia.

4.2.1. Variáveis regionalizadas

Segundo Blais e Carlier (1968), citados por Olea (1975), uma variável regionalizada é uma função numérica com distribuição espacial, que varia de um ponto a outro com continuidade aparente, mas cujas variações não podem ser representadas por uma função matemática simples.

A teoria das variáveis regionalizadas pressupõe que a variação de uma variável pode ser expressa por três componentes (Burrough, 1987):

- a) componente estrutural, associada a um valor médio constante ou a uma tendência constante;
- b) componente aleatória, espacialmente correlacionada;
- c) ruído aleatório ou erro residual.

Se x representar as coordenadas, então o valor da variável Z , em x , é dada por (Burrough, 1987):

$$Z(x) = m(x) + \varepsilon'(x) + \varepsilon''(x) \quad (4.2)$$

onde,

$m(x)$ é uma função determinística que descreve a componente estrutural de Z em x ;

$\varepsilon'(x)$ é um termo estocástico, que varia localmente e depende espacialmente de $m(x)$;

$\varepsilon''(x)$ é um ruído aleatório não correlacionado, com distribuição normal, média zero e variância σ^2 .

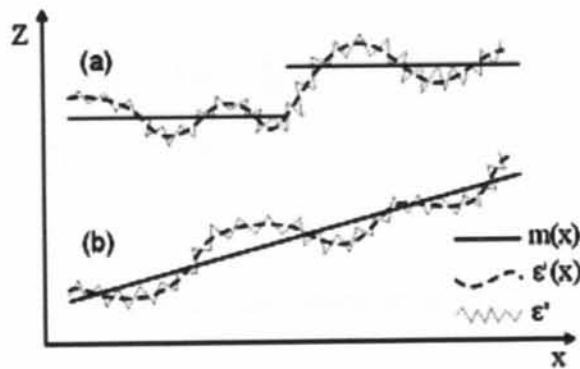


Figura 4.1 - Componentes de uma variável regionalizada (Burrough, 1987).

Na figura 4.1, a componente determinística em (a) apresenta possui um comportamento regular (diferença entre os níveis médios), enquanto que em (b) apresenta uma tendência constante.

4.2.2. Hipóteses restritivas

Nos modelos geoestatísticos, a inferência espacial é fundamentada na teoria das variáveis regionalizadas, sendo o primeiro passo a definição de uma função adequada para a componente determinística $m(x)$. Para tanto, algumas hipóteses são necessárias (Burrough, 1987 e David, 1977).

4.2.2.1. Estacionariedade de 2ª Ordem

Admite-se que a componente determinística, $m(x)$, é constante (não há tendências na região). Então, $m(x)$ é igual ao valor esperado da variável aleatória Z na posição x , e a diferença média entre os valores observados em, x e $x+h$, separados por um vector de distância h , é nula.

$$E\{Z(x) - Z(x+h)\} = 0 \text{ ou } E\{Z(x)\} = E\{Z(x+h)\} = m(x) = m \quad (4.3)$$

onde,

E é a esperança matemática.

Admite-se também que, a covariância entre $Z(x)$ e $Z(x+h)$, existe e depende apenas de h . Então,

$$\begin{aligned} C(h) &= \text{Cov}\{Z(x), Z(x+h)\} = E\{[Z(x) - m][Z(x+h) - m]\} = \\ &= E\{Z(x)Z(x+h)\} - m^2, \forall x \end{aligned} \quad (4.4)$$

onde,

$\text{Cov}\{Z(x), Z(x+h)\}$ é a covariância entre $Z(x)$ e $Z(x+h)$.

Da equação (4.4), conclui-se que a estacionariedade da covariância implica a estacionariedade da variância:

$$\begin{aligned} \text{Var}\{Z(x)\} &= E\{[Z(x) - m]^2\} = E\{Z^2(x)\} - 2E\{Z(x)\}m + m^2 = \\ &= E\{Z(x)Z(x+0)\} - 2m^2 + m^2 = \\ &= E\{Z(x)Z(x+0)\} - m^2 = C(0), \forall x \end{aligned} \quad (4.5)$$

em que,

Var é a variância.

Por sua vez, a estacionariedade da covariância também implica a estacionariedade do variograma, definido por:

$$2\gamma(h) = E\{[Z(x) - Z(x+h)]^2\} \quad (4.6)$$

Na verdade, desenvolvendo a equação (4.6) obtemos:

$$\begin{aligned} 2\gamma(h) &= E\{Z^2(x) - 2Z(x)Z(x+h) + Z^2(x+h)\} \\ &= E\{Z^2(x)\} - 2E\{Z(x)Z(x+h)\} + E\{Z^2(x+h)\} \end{aligned} \quad (4.7)$$

Das equações (4.4) e (4.5) obtém-se, respectivamente:

$$E\{Z(x)Z(x+h)\} = C(h) + m^2 \quad (4.8)$$

e

$$E\{Z(x)Z(x+0)\} = E\{Z^2(x)\} = C(0) + m^2 \quad (4.9)$$

Substituindo as equações (4.8) e (4.9) na equação (4.7), obtemos:

$$\begin{aligned} 2\gamma(h) &= C(0) + m^2 - 2(C(h) + m^2) + C(0) + m^2 = \\ &= 2C(0) - 2C(h) \end{aligned} \quad (4.10)$$

Simplificando a equação (4.10), resulta:

$$\gamma(h) = C(0) - C(h) \quad (4.11)$$

em que,

$\gamma(h)$ representa uma função conhecida na teoria das variáveis regionalizadas como **semivariograma**.

A relação (4.11) indica que, relativamente à hipótese de estacionariedade de 2ª ordem, a covariância e o semivariograma são formas alternativas de caracterizar a autocorrelação entre $Z(x)$ e $Z(x+h)$.

A hipótese de estacionariedade de 2ª ordem supõe a existência de covariância e, portanto, de variância finita (equação 4.5). Podemos então definir o correlograma, $\rho(h)$, dividindo ambos os membros da equação (4.11) por $C(0)$:

$$\rho(h) = \frac{C(h)}{C(0)} = \frac{C(0)}{C(0)} - \frac{\gamma(h)}{C(0)} = 1 - \frac{\gamma(h)}{C(0)} \quad (4.12)$$

As restrições impostas à estacionariedade de 2ª ordem podem não ser satisfeitas para alguns fenómenos físicos que apresentam uma capacidade infinita de dispersão (David, 1977). Capacidade infinita de dispersão implica a não existência de $C(h)$ e $Var\{Z(x)\}$, podendo no entanto existir $\gamma(h)$. Para tais situações, pode ser aplicável uma hipótese menos restritiva, a hipótese intrínseca.

4.2.2.2. Estacionariedade Intrínseca

De modo análogo à hipótese anterior, admite-se que $E[Z(x)] = m(x) = m, \forall x$.

Além disso, admite-se também que a variância das diferenças depende apenas da distância h , isto é:

$$\text{Var}\{Z(x) - Z(x+h)\} = E\{[Z(x) - Z(x+h)]^2\} = 2\gamma(h) \quad (4.13)$$

Segundo David (1977), esta hipótese é a mais frequente em geoestatística, principalmente por ser a menos restritiva. Isto é, requer apenas a existência e estacionariedade do variograma, sem nenhuma restrição quanto à existência de variância finita.

4.2.3. Análise da continuidade espacial

Na metodologia geoestatística, os instrumentos de medida da continuidade espacial das características de um recurso natural ou fenómeno espacial, cumprem fundamentalmente dois objectivos: caracterização e quantificação do modo como se dispersam espacialmente - análise estrutural (Pereira, 1981). Além disso, servem de base aos processos de inferência espacial/estimação e simulação.

4.2.3.1. Estimadores da continuidade espacial

Sendo $()$ uma característica quantitativa, os diagramas de representação (biponto) dos pares de pontos $Z(x)$ e $Z(x+h)$, distanciados de h , são dos estatísticos com informação mais rica sobre a continuidade espacial de $Z(x)$.

Não obstante, para melhor interpretação e posterior utilização, existem algumas medidas de síntese da dispersão das várias nuvens $(Z(x), Z(x+h))$ que podem originar instrumentos quantificadores da continuidade de $Z(x)$.

De acordo com Cressie, 1991, a continuidade espacial de $Z(x)$ pode ser medida, para os vários valores de h , pelos estimadores, Semivariograma, Covariância não centrada, Covariância centrada e Correlograma que se apresentam de seguida:

- **Semivariograma¹**

O semivariograma é uma ferramenta de suporte às técnicas de inferência espacial, que permite representar quantitativamente a variação de um fenómeno regionalizado no espaço (Huijbregts, 1975).

Considerando a equação (4.13) e uma amostra $Z(x_\alpha)$, $\alpha = 1, 2, \dots, n$, o método clássico de estimar o semivariograma é apresentado na equação (4.14) (Isaaks e Shrivastava, 1989).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{\alpha=1}^{N(h)} [Z(x_\alpha) - Z(x_\alpha + h)]^2 \quad (4.14)$$

em que,

$N(h)$ é o número de pares de pontos para cada valor de h .

$Z(x_\alpha)$ e $Z(x_\alpha + h)$ são valores da i -ésima observação da variável regionalizada, nos pontos x_α e $x_\alpha + h$ ($\alpha = 1, 2, \dots, n$), separados pelo vector h .

- **Covariância não centrada**

$$C'(h) = \frac{1}{N(h)} \sum_{\alpha=1}^{N(h)} [Z(x_\alpha)Z(x_\alpha + h)] \quad (4.15)$$

- **Covariância centrada**

$$C(h) = \frac{1}{N(h)} \sum_{\alpha=1}^{N(h)} [Z(x_\alpha)Z(x_\alpha + h)] - m(x_\alpha)m(x_\alpha + h) \quad (4.16)$$

sendo:

$$m(x_\alpha) = \frac{1}{N(h)} \sum_{\alpha=1}^{N(h)} Z(x_\alpha) \quad (4.17)$$

e

¹ Também denominado variograma.

$$m(x_{\alpha} + h) = \frac{1}{N(h)} \sum_{\alpha=1}^{N(h)} Z(x_{\alpha} + h) \quad (4.18)$$

as médias aritméticas de todos os pontos localizados em x_{α} e $x_{\alpha} + h$, $\alpha = 1, \dots, N(h)$.

- Correlograma (forma normalizada da covariância)

$$\rho(h) = \frac{C(h)}{\sqrt{\sigma^2(x_{\alpha})\sigma^2(x_{\alpha} + h)}} \quad (4.19)$$

em que:

$$\sigma^2(x_{\alpha}) = \frac{1}{N(h)} \sum_{\alpha=1}^{N(h)} [Z(x_{\alpha}) - m(x_{\alpha})]^2 \quad (4.20)$$

e

$$\sigma^2(x_{\alpha} + h) = \frac{1}{N(h)} \sum_{\alpha=1}^{N(h)} [Z(x_{\alpha} + h) - m(x_{\alpha} + h)]^2 \quad (4.21)$$

4.2.3.2. Modelos teóricos de semivariogramas

Calculados os valores do gráfico do semivariograma, através da equação (4.14), é necessário modelá-lo por uma função geral e representativa, o que significa ajustá-lo por uma curva atenuada média, função de um número reduzido de parâmetros que quantifique a continuidade espacial da variável $Z(x)$. Assim, o modelo de semivariograma escolhido é a interpretação da estrutura de correlação espacial a ser utilizada nos procedimentos inferenciais da estimação geoestatística. Os parâmetros considerados estão relacionados com a escala, extensão da continuidade (amplitude) e valor onde o semivariograma se estabiliza (patamar), e a forma da dependência espacial.

A análise da variação em pequena escala procura dimensionar o grau de continuidade em distâncias muito pequenas. Teoricamente, sendo o processo contínuo, quando h tende para zero o semivariograma também tende para zero. No entanto, devido a descontinuidades geradas por variações que ocorrem em escala abaixo da frequência de amostragem ($1/h$), é necessário incorporar no modelo o denominado "efeito pepita" ("nugget effect"). Como nada podemos afirmar para intervalos menores do que a menor distância entre duas amostras, a forma de incorporar essas descontinuidades é acrescentar

ao modelo uma constante (C_0), calculada através da extrapolação do semivariograma para intervalos muito pequenos. Na prática como a frequência de amostragem é muitas vezes irregular é usual definirmos uma tolerância na determinação dos intervalos h - lags.

A inclinação da curva da função do semivariograma em relação ao número de intervalos (*lags*) indica o grau de dependência espacial da variável, e o valor de h onde o semivariograma se estabiliza, a amplitude (*range*), é a distância até onde se considera existir dependência espacial.

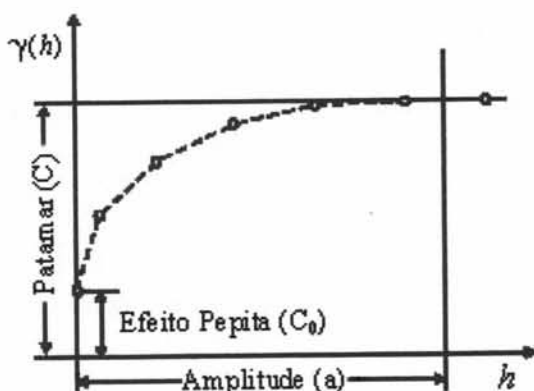


Figura 4.2 - Parâmetros do semivariograma (Isaaks e Srivastava, 1989).

Na figura 4.2 podemos observar os parâmetros do semivariograma:

- **Amplitude (a):** distância a partir da qual os valores de $Z(x)$ deixam de estar correlacionados, isto é, os valores de $\gamma(h)$ param de crescer e estabilizam num patamar.
- **Patamar (C):** valor do semivariograma correspondente à amplitude. A partir deste ponto considera-se que deixa de existir dependência espacial entre as amostras, porque a variância da diferença entre pares de amostras torna-se aproximadamente constante.
- **Efeito pepita (C_0):** valor do semivariograma para a distância zero. Por definição, $\gamma(0) = 0$ (equação 4.13). No entanto, na prática, à medida que a distância h tende para 0 (zero), $\gamma(h)$ aproxima-se de um valor positivo chamado Efeito Pepita (C_0), que revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias

menores do que a menor distância entre as amostras. Parte desta descontinuidade pode ser também devida a erros de medição (Isaaks e Srivastava, 1989), mas é impossível quantificar se a maior contribuição provém dos erros de medição ou da variabilidade de pequena escala não captada pela amostragem.

Refira-se ainda que, o procedimento de ajuste não é directo e automático, como por exemplo, no caso de uma regressão, mas sim interactivo, sendo necessário um primeiro ajuste e verificar a adequação do modelo teórico. Dependendo do resultado obtido, podemos ou não redefinir o modelo até obtermos um ajuste que seja considerado satisfatório (Camargo, 2000).

Pelo exposto, e por se pretender modelar fenómenos com capacidade finita de dispersão, os modelos estudados no âmbito deste trabalho, e aqui apresentados, são modelos com patamar (C), sendo $C_1 = C - C_0$. Para além das funções mais utilizadas - modelos esférico, exponencial e Gaussiano - (Isaaks e Shrivastava, 1989) foram também analisados os modelos cúbico e *dampened hole*.

Modelo esférico

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C_1 \left[1,5 \frac{h}{a} - 0,5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] & \text{para } h \leq a \\ C_0 + C_1 & \text{para } h > a \end{cases} \quad (4.22)$$

Trata-se de um dos modelos mais usuais em geoestatística caracterizado por um comportamento linear junto à origem, isto é, nos primeiros intervalos.

Modelo exponencial

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - e^{-\frac{3h}{a}} \right] \quad (4.23)$$

Neste modelo, a amplitude a corresponde ao valor para o qual o semivariograma tende assintoticamente, considerando-se a distância em que o modelo atinge 95% do patamar: $\gamma(a) = 0,95C$.

Modelo Gaussiano

Quaisquer das duas funções apresentadas - modelo esférico e exponencial - tem um crescimento relativamente rápido junto da origem, denunciando um comportamento típico de fenómenos relativamente irregulares. Outros fenómenos, bastante mais regulares e contínuos, denunciam um crescimento lento de $\gamma(h)$ com um comportamento parabólico na origem. É o caso dos semivariogramas ajustáveis por modelos Gaussianos:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left(1 - e^{-3\left(\frac{h}{a}\right)^2} \right) \quad (4.24)$$

Tal como no modelo exponencial, a amplitude a é a distância para a qual o modelo atinge 95% do patamar: $\gamma(a) = 0,95C$.

Modelo cúbico

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C_1 \left[7\left(\frac{h}{a}\right)^2 - 8,75\left(\frac{h}{a}\right)^3 + 3,5\left(\frac{h}{a}\right)^5 - 0,75\left(\frac{h}{a}\right)^7 \right] & , \quad h \leq a \\ C_0 + C_1 & , \quad h > a \end{cases} \quad (4.25)$$

O modelo cúbico (Galli et al., 1984; Chilès e Delfiner, 1999) apresenta um comportamento parabólico na origem e é preferido em relação ao modelo gaussiano por evitar instabilidade numérica no sistema de equações da estimação geoestatística (Wackernagel, 1998).

Modelo dampened hole

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - e^{-\frac{3h}{d}} \cos\left(\frac{h}{a}\pi\right) \right] \quad (4.26)$$

onde,

d é a distância em que o modelo atinge 95% do efeito de "buraco" (*hole*).

Este modelo é mais complexo e usado para modelar efeitos de "buraco" (*hole*) (Deutsch & Journel, 1998).

4.2.4. Estimação geoestatística: Krigagem

A Krigagem é um procedimento de interpolação de valores numa superfície contínua, diferindo dos outros métodos de interpolação por fazer uso explícito da variância entre os valores observados - o semivariograma. Baseia-se na combinação linear ponderada dos dados disponíveis, aplicada ao modelo teórico de semivariograma adoptado (Isaaks e Shrivastava, 1989). No método de cálculo dos ponderadores, o formalismo geoestatístico assenta em dois critérios de qualidade: o não-enviesamento e a variância de estimação mínima (Bailey e Gatrell, 1995).

Seja,

$$[Z(x_0)]^* = \sum_{\alpha=1}^N \lambda_{\alpha} Z(x_{\alpha}) \quad (4.27)$$

o estimador da variável em estudo no ponto desejado (x_0) resultante da combinação linear das variáveis $Z(x_{\alpha})$, $\alpha = 1, \dots, N$,

e

$$\varepsilon(x_0) = [Z(x_0)]^* - Z(x_0) = \sum_{\alpha=1}^N \lambda_{\alpha} Z(x_{\alpha}) - Z(x_0) \quad (4.28)$$

o erro que se comete ao estimar o valor de $Z(x)$ em x_0 .

O primeiro critério de qualidade do estimador $[Z(x_0)]^*$ diz respeito à sua esperança:

$$E\{[Z(x_0)]^*\} = E\{Z(x_0)\} = m \quad (4.29)$$

Para garantir a condição de não-enviesamento, o valor esperado dos resíduos deve ser nulo ($E\{\varepsilon(x_0)\} = 0$).

De acordo com o formalismo probabilístico do nosso modelo:

$$E\{\varepsilon(x_0)\} = E\left\{\sum_{\alpha=1}^N \lambda_{\alpha} Z(x_{\alpha})\right\} - E\{Z(x_0)\} = \sum_{\alpha=1}^N \lambda_{\alpha} E\{Z(x_{\alpha})\} - E\{Z(x_0)\} \quad (4.30)$$

Assim, como a função aleatória é estacionária, $E\{Z(x_\alpha)\} = E\{Z(x_0)\} = m$, para que a equação (4.30) assumo o valor nulo a soma dos ponderadores tem de ser igual a 1:

$$\sum_{\alpha=1}^N \lambda_\alpha = 1 \quad (4.31)$$

O segundo critério de qualidade do estimador diz respeito à variância do erro, $\varepsilon(x_0)$. Dois estimadores podem ter média de $\varepsilon(x_0)$ nula, mas a dispersão em torno da média determina a diferença da qualidade dos estimadores:

$$\begin{aligned} \text{var}\{\varepsilon(x_0)\} &= \text{var}\left\{\left[Z(x_0)\right]^* - Z(x_0)\right\} \\ &= E\left\{\left[\sum_{\alpha=1}^N \lambda_\alpha Z(x_\alpha) - Z(x_0)\right]^2\right\} \\ &= E\left\{\sum_{\alpha=1}^N \sum_{\beta=1}^N \lambda_\alpha \lambda_\beta Z(x_\alpha) Z(x_\beta) + Z^2(x_0) - 2 \sum_{\alpha=1}^N \lambda_\alpha Z(x_\alpha) Z(x_0)\right\} \\ &= E\left\{\sum_{\alpha=1}^N \sum_{\beta=1}^N \lambda_\alpha \lambda_\beta Z(x_\alpha) Z(x_\beta)\right\} + E\{Z^2(x_0)\} - E\left\{2 \sum_{\alpha=1}^N \lambda_\alpha Z(x_\alpha) Z(x_0)\right\} \\ &= \sum_{\alpha=1}^N \sum_{\beta=1}^N \lambda_\alpha \lambda_\beta E\{Z(x_\alpha) Z(x_\beta)\} + E\{Z^2(x_0)\} - 2 \sum_{\alpha=1}^N \lambda_\alpha E\{Z(x_\alpha) Z(x_0)\} \end{aligned}$$

Uma vez definido o modelo de covariância ou semivariograma, $C(h)$ ou $\gamma(h)$, válido para todo o campo de $Z(x)$, então podemos escrever a expressão da variância de estimação de qualquer estimador em função das covariâncias entre as amostras e das covariâncias entre as amostras e o ponto a estimar:

$$\text{var}\{\varepsilon(x_0)\} = C(0) + \sum_{\alpha=1}^N \sum_{\beta=1}^N \lambda_\alpha \lambda_\beta C(x_\alpha, x_\beta) - 2 \sum_{\alpha=1}^N \lambda_\alpha C(x_\alpha, x_0) \quad (4.32)$$

Pelo exposto, o estimador linear geoestatístico (4.27), denominado Krigagem Normal, é uma combinação linear do conjunto de N variáveis vizinhas de x_0 - $Z(x_\alpha)$, $\alpha = 1, \dots, N$ que cumpre os dois critérios de qualidade.

Como vimos anteriormente, o primeiro critério é conseguido pela imposição, aos ponderadores, da condição (4.31). Por sua vez, assegura-se a minimização da variância de estimação (4.32) igualando a zero as N derivadas parciais em ordem a λ_α , $\alpha = 1, \dots, N$ e

resolvendo o sistema de N equações a N incógnitas. No entanto, como se pretende que a solução das N incógnitas cumpra a condição (4.31), então a minimização pode ser resolvida através do formalismo de Lagrange, o que implica que seja adicionada a equação (4.31), e consequentemente mais uma incógnita - o parâmetro de Lagrange μ - à equação (4.32):

$$\begin{aligned} \text{var}\{\varepsilon(x_0)\} = & C(0) + \sum_{\alpha=1}^N \sum_{\beta=1}^N \lambda_{\alpha} \lambda_{\beta} C(x_{\alpha}, x_{\beta}) - 2 \sum_{\alpha=1}^N \lambda_{\alpha} C(x_{\alpha}, x_0) + \\ & + 2\mu \underbrace{\left[\sum_{\alpha=1}^N \lambda_{\alpha} - 1 \right]}_{=0} \end{aligned} \quad (4.33)$$

Assim, a minimização de (4.33) consiste em igualar a zero as $N+1$ derivadas parciais em ordem a λ_{α} e μ :

$$\begin{cases} \frac{\partial \left[C(0) + \sum_{\alpha=1}^N \sum_{\beta=1}^N \lambda_{\alpha} \lambda_{\beta} C(x_{\alpha}, x_{\beta}) - 2 \sum_{\alpha=1}^N \lambda_{\alpha} C(x_{\alpha}, x_0) + 2\mu \left[\sum_{\alpha=1}^N \lambda_{\alpha} - 1 \right] \right]}{\partial \lambda_{\alpha}} = 0 \\ \frac{\partial \left[C(0) + \sum_{\alpha=1}^N \sum_{\beta=1}^N \lambda_{\alpha} \lambda_{\beta} C(x_{\alpha}, x_{\beta}) - 2 \sum_{\alpha=1}^N \lambda_{\alpha} C(x_{\alpha}, x_0) + 2\mu \left[\sum_{\alpha=1}^N \lambda_{\alpha} - 1 \right] \right]}{\partial \mu} = 0 \end{cases}$$

donde,

$$\begin{cases} 2 \sum_{\beta=1}^N \lambda_{\beta} C(x_{\alpha}, x_{\beta}) - 2 C(x_{\alpha}, x_0) + 2\mu = 0 \\ \sum_{\alpha=1}^N \lambda_{\alpha} = 1 \end{cases}$$

Logo, o sistema de Krigagem de $N+1$ equações, cuja solução fornece os N ponderadores λ_{α} , é o seguinte:

$$\begin{cases} \sum_{\beta=1}^N \lambda_{\beta} C(x_{\alpha}, x_{\beta}) + \mu = C(x_{\alpha}, x_0) \\ \sum_{\alpha=1}^N \lambda_{\alpha} = 1 \end{cases} \quad (4.34)$$

O valor mínimo da variância de estimação obtém-se pela substituição de (4.34) na equação da variância (4.32):

$$\sigma_E^2(x_0) = C(0) + \sum_{\alpha=1}^N \lambda_{\alpha} C(x_{\alpha}, x_0) - \mu - 2 \sum_{\alpha=1}^N \lambda_{\alpha} C(x_{\alpha}, x_0)$$

donde,

$$\sigma_E^2(x_0) = C(0) - \sum_{\alpha=1}^N \lambda_{\alpha} C(x_{\alpha}, x_0) - \mu \quad (4.35)$$

Refira-se ainda que, de acordo com a equação (4.11) podemos escrever o sistema de Krigagem em função do semivariograma $\gamma(h)$:

$$\begin{cases} \sum_{\beta=1}^N \lambda_{\beta} \gamma(x_{\alpha}, x_{\beta}) - \mu = \gamma(x_{\alpha}, x_0) \\ \sum_{\alpha=1}^N \lambda_{\alpha} = 1 \end{cases} \quad (4.36)$$

Neste caso, a variância de estimação fica igual a:

$$\sigma_E^2(x_0) = \sum_{\alpha=1}^N \lambda_{\alpha} \gamma(x_{\alpha}, x_0) + \mu \quad (4.37)$$

O sistema de $N+1$ equações obtido em (4.36) pode ser descrito em notação matricial. Designando por K a matriz de variâncias entre amostras, M a matriz do 2º membro - variâncias entre amostras e o ponto a estimar - e λ a matriz dos ponderadores, isto é:

$$[K] = \begin{bmatrix} \gamma(x_1, x_1) & \gamma(x_1, x_2) & \cdots & \gamma(x_1, x_N) & 1 \\ \gamma(x_2, x_1) & \gamma(x_2, x_2) & \cdots & \gamma(x_2, x_N) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \gamma(x_N, x_1) & \gamma(x_N, x_2) & \cdots & \gamma(x_N, x_N) & 1 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[M] = \begin{bmatrix} \gamma(x_1, x_0) \\ \gamma(x_2, x_0) \\ \vdots \\ \gamma(x_N, x_0) \\ 1 \end{bmatrix} \quad [\lambda] = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_N \\ \mu \end{bmatrix}$$

Assim, o sistema de Krigagem fica igual a $[K] \cdot [\lambda] = [M]$ cuja solução resulta, após inversão de $[K]$:

$$[\lambda] = [K]^{-1} \cdot [M] \quad (4.38)$$

e

$$\sigma_E^2(x_0) = [\lambda]^T \cdot [M] \quad (4.39)$$

Definindo $[Z]$ como o vector dos valores $Z(x_\alpha)$, $[Z] = [Z(x_1), \dots, Z(x_N)]$, então o estimador $[Z(x_0)]^*$ fica igual a

$$[Z(x_0)]^* = [\lambda]^T \cdot [Z] = [M]^T \cdot [K]^{-1} \cdot [Z] \quad (4.40)$$

4.3. Sumário

No âmbito do trabalho que respeita esta dissertação e de forma a tornar possível a aplicação o modelo de balanço hídrico do solo a qualquer localização da região em estudo tornou-se necessário estimar valores para localizações em que não existiam dados amostrais relativos aos parâmetros meteorológicos.

Por conseguinte, neste capítulo apresentaram-se os métodos de inferência mais usuais em cartografia, classificados em dois modelos: Deterministas e Geoestatísticos.

Os métodos deterministas, embora continuem a ter grande aplicação na cartografia de fenómenos espaciais, calculam um valor de uma grandeza no espaço a partir de uma combinação linear dos valores observados mas com base critérios geométricos para determinar a influência das amostras, isto é, a proximidade dos valores observados ao ponto a estimar. Dos métodos deterministas apresentados, o que melhor se adapta a fenómenos com continuidade espacial e que, pelas suas características, produz melhores resultados, é o método do inverso da potência das distâncias.

No entanto, as variáveis relacionadas com os fenómenos naturais dependem fortemente da localização espacial e esta dependência não é determinista. Por um lado, devido ao seu carácter aleatório, ou seja, à sua variação imprevisível no espaço, embora com continuidade aparente e, por outro lado, às correlações existentes entre as diversas localizações onde o fenómeno ocorre. Por conseguinte, apresentou-se um método

de estimação geoestatística conhecido por Krigagem, mais adequado a fenômenos naturais, mas que envolve uma análise da continuidade espacial, nem sempre com bons resultados, para caracterização e quantificação do modo como o fenômeno se dispersa espacialmente. No entanto, o processo de ajuste é limitado a funções parametrizáveis com um número reduzido de parâmetros.

5. Armazenamento e tratamento de dados

No primeiro capítulo analisaram-se as potencialidades e limitações dos Sistemas de Informação Geográfica. Seguidamente, foi apresentado e descrito o modelo de simulação do balanço hídrico do solo adoptado, essencial para análise das necessidades em água para rega de uma cultura. Encontrados os parâmetros necessários e a estratégia de cálculo a seguir, com o intuito de generalizar a aplicabilidade do modelo a zonas em que tais parâmetros não são amostrados, apresentou-se, no capítulo anterior, uma reflexão das possíveis metodologias para inferência de valores.

No processo de desenvolvimento do protótipo, numa primeira fase foi necessário recolher, armazenar e tratar os dados subjacentes ao problema inicialmente proposto. Esta fase do projecto, dado o volume de informação, bem como as limitações dos GIS's em termos de análise espacial e de séries temporais de dados, embora indispensável, revelou-se uma tarefa árdua e morosa.

Neste capítulo, efectua-se a apresentação e descrição do trabalho desenvolvido em termos de armazenamento e tratamento dos dados.

5.1. Recolha de informação

Como primeira aproximação, começou-se por recolher a informação meteorológica disponível, necessária à aplicação do método de Penman-Monteith modificado (secção 3.4.1) e à realização do balanço hídrico do solo, isto é, identificação de locais em que houvesse registos dos seguintes elementos do clima: temperatura do ar, humidade relativa do ar, insolação, velocidade do vento e precipitação. Para tal, recorreu-se aos registos publicados nos anuários do Instituto Nacional de Meteorologia. O resultado dessa pesquisa resume-se na tabela 5.1.

Local	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Altura do Anemómetro (m)	Período
Anadia	40°26'	-8°26'	45	4	1959/88
Bigorne	41°00'	-7°53'	975	6	1959/87
Caramulo	40°34'	-8°10'	810	8,5	1959/88
Coimbra	40°12'	-8°25'	141	10,5	1959/88
Coimbra/Bencanta	40°13'	-8°27'	35	4	1960/88
Guarda	40°32'	-7°16'	1019	24	1959/88
Lagoa Comprida	40°23'	-7°38'	1604	4,5	1959/88
Lousã/Boa Vista	40°08'	-8°10'	401	6	1964/82
Moimenta da Beira	40°59'	-7°38'	670	4/6	1959/85
Nelas	40°31'	-7°51'	440	6	1959/88
Penhas Douradas	40°25'	-7°33'	1380	12,7	1959/88
Serra da Muna	40°43'	-7°53'	628	6	1959/88
Teixoso/Lamacais	40°18'	-7°24'	460	4	1980/86
Viseu	40°40'	-7°54'	443	4	1959/88

Tabela 5.1 - Estações meteorológicas e períodos de que dispomos informação climática mensal.

Pode constatar-se que a informação disponível cobre as situações mais características da região, no que diz respeito à situação climática. No entanto, a comparação de resultados só seria possível se fossem analisados períodos comuns, o que se resumiu a uma série de 30 anos, de 1959 a 1988. A este respeito refira-se ainda que, nesta série, existem meses em que há inexistência de registos de valores de algumas das variáveis, ou mesmo estações que não registam dados de todos os elementos.

Relativamente à precipitação existe muita informação disponível, para além dos registos das 14 estações meteorológicas (tabela 5.1). Na tabela 5.2 apresenta-se um resumo com 25 postos pluviométricos.

Local	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Período
Albergaria-a-Velha	40°41'59"	-8°28'51"	131	1959/95
Bouça - pessegueiro do Vouga	40°41'40"	-8°22'19"	150	1977/95
Brufe - Barreiros	40°45'16"	-7°46'48"	625	1981/95
Caldas da Felgueira	40°29'	-7°52'	200	1959/95
Calde	40°46'49"	-7°54'52"	520	1981/95
Carregal do Sal	40°26'	-8°00'	309	1981/95
Celorico da Beira	40°39'	-7°23'	475	1959/95
Forninhos	40°42'	-7°33'	500	1981/95
Fornos de Algodres	40°37'	-7°32'	500	1959/95
Fragosela de Baixo	40°38'	-7°52'	395	1981/95
Lobagueira - Bodiosa	40°42'03"	-7°59'09"	524	1981/95
Mangualde	40°36'	-7°46'	549	1959/95
Oliveira do Hospital	40°22'	-7°52'	480	1959/95
Penalva do Castelo	40°40'	-7°41'	375	1981/95
Pindelo dos Milagres	40°48'27"	-7°57'41"	450	1981/95
Quinta da Fumadinha	40°50'14"	-7°34'39"	806	1981/95
Ribeiradio	40°44'16"	-8°17'58"	191	1977/95
S. Martinho das Moitas	40°53'09"	-8°01'48"	191	1981/95
S. Pedro do Sul	40°45'03"	-8°04'07"	160	1959/95
Santa Comba Dão	40°24'	-8°09'	250	1959/95
São Joaninho	40°27'	-8°07'	322	1981/95
Sátão	40°44'	-7°45'	580	1960/95
Sejães - Oliveira de Frades	40°44'42"	-8°12'32"	146	1981/95
Tábua	40°21'	-8°02'	225	1981/95
Vilar de Besteiros	40°35'	-8°05'	350	1981/95

Tabela 5.2 - Estações udométricas e períodos de que dispomos informação climática mensal.

Saliente-se que esta informação se revelou de primordial importância para a análise da continuidade espacial de cada uma das variáveis, indispensável na decisão do modelo de inferência espacial a adoptar, e com reflexos na produção dos mapas temáticos, assim como no processo de simulação da reserva de água no solo para períodos diários.

Relativamente aos dados diários necessários à determinação da reserva de água no solo ao longo do ciclo vegetativo da cultura da vinha, estes são calculados a partir dos dados horários recolhidos por duas estações meteorológicas automáticas. Uma situada na Quinta da Alagoa, na Escola Superior Agrária de Viseu e outra no Centro de Estudos Vitivinícolas do Dão, em Nelas.

5.2. Armazenamento e organização dos dados

Actualmente, na maioria dos GIS's, os objectos geográficos são descritos em termos da sua localização espacial e de dados alfanuméricos que os caracterizam. Numa primeira fase, procedeu-se à importação, criação e tratamento da informação cartográfica, bem como à organização dos dados alfanuméricos. Seguidamente, estabeleceu-se a ligação entre a informação cartográfica e alfanumérica. Por fim, converteu-se a informação cartográfica para o formato de dados espacial subjacente à ferramenta GIS utilizada na implementação do local Web.

5.2.1. Dados cartográficos

A base cartográfica digital, em estrutura vectorial, na escala 1:250 000, referente aos limites administrativos dos concelhos, altimetria e hidrografia foi obtida mediante celebração de protocolo com o Instituto Geográfico do Exército. Por sua vez, no que respeita aos limites administrativos das freguesias (Figura 5.1), foi usada a informação disponibilizada *on-line*, no mesmo formato e escala, pelo Sistema Nacional de Informação Geográfica (SNIG).



Figura 5.1 - Cartografia digital dos limites administrativos das freguesias.

Obtida a informação cartográfica, usou-se a ferramenta *Autodesk Map* para importação e tratamento da informação, bem como para criação das *layers* relativas à representação e localização das estações meteorológicas e postos pluviométricos. Depois de adaptada a informação cartográfica à região de estudo, para tornar possível a produção

dinâmica de mapas temáticos no modelo vectorial, foi necessário criar uma malha regular auxiliar, abrangente de toda a região (Figura 5.2). Para este fim, implementou-se, no *Autodesk Map*, uma macro em *Visual Basic* que gerou uma malha com células de dimensão de 500mx500m. Esta malha revelou-se primordial para o mapeamento dos fenómenos, sendo consoante o caso, inferidos valores para todos os centróides das suas células a partir dos dados pontuais das amostras existentes.

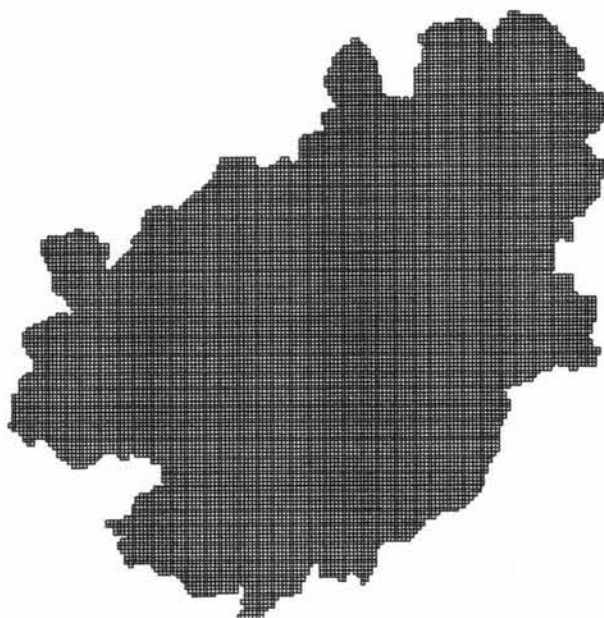


Figura 5.2 - *Layer* correspondente à malha gerada.

Importa ainda referir que toda a informação cartográfica foi georeferenciada ao mesmo sistema de coordenadas (Portugal, IGC3 *System*).

5.2.2. Dados alfanuméricos

Com a adopção da tecnologia de bases de dados, a modelação dos dados alfanuméricos foi sem dúvida uma actividade primordial para o desenvolvimento e funcionalidade do trabalho realizado. Efectivamente, o levantamento da totalidade dos requisitos de informação para definição de uma estrutura lógica dos dados que satisfizesse esses requisitos foi uma das fases de projecto essencial para corresponder às necessidades e objectivos. Não obstante, a definição de uma correcta estrutura lógica de dados possibilita a integração de desenvolvimentos futuros.

A estratégia ou metodologia genérica considerada na tarefa de concepção do esquema da base de dados foi a abordagem *top-down*, ou seja, partiu-se do geral para o particular. Começou-se por identificar as entidades e relacionamentos entre entidades, segundo o modelo conceptual entidade-relacionamento (E-R).

Obtido o modelo conceptual de dados e uma vez que se usou como Sistema de Gestão de Base de Dados (SGBD) o *Microsoft Access*, foi necessário proceder à tradução do modelo E-R para o modelo de base de dados inerente ao *Microsoft Access* - Modelo Relacional.

Nas duas subsecções seguintes apresentam-se os dois modelos, Conceptual e Relacional.

Modelo conceptual

Como anteriormente referido, no processo de organizar e esquematizar a informação de modo a integrar os dados numa base de dados, recorreu-se a uma das abordagens formais mais vulgarizadas, conhecida como modelo conceptual entidade-relacionamento (E-R) de Chen (1976) (Mendes, 1995; Silberschatz, 1999).

O modelo E-R é um modelo baseado em objectos que procura criar uma simulação ou representação da realidade através dos conceitos de entidade e de relacionamento ou associação. Com base na análise da realidade a modelar são identificadas várias classes de elementos, designadas por entidades que, por sua vez, interagem umas com as outras através de associações ou relacionamentos de vários tipos (Silberschatz, 1999).

De acordo com a metodologia de modelação de dados apresentada, foi obtido um diagrama E-R que traduz a estrutura lógica dos dados correspondentes aos requisitos de informação identificados para implementação do sistema desenvolvido (figura 5.3).

Para uma melhor compreensão do diagrama refira-se que:

- 89

Modelo relacional

De acordo com as características e necessidades intrínsecas ao problema, optou-se pelo modelo de base de dados relacional, facilmente integrável com a ferramenta GIS, tendo-se usado como Sistema de Gestão de Base de Dados, o *Microsoft Access*.

Por conseguinte, o modelo conceptual de dados foi traduzido para o modelo de base de dados correspondente - Modelo Relacional, tendo em conta as entidades envolvidas e, a cardinalidade e obrigatoriedade dos relacionamentos.

Na figura 5.4 apresenta-se o diagrama de relações do *Microsoft Access*.

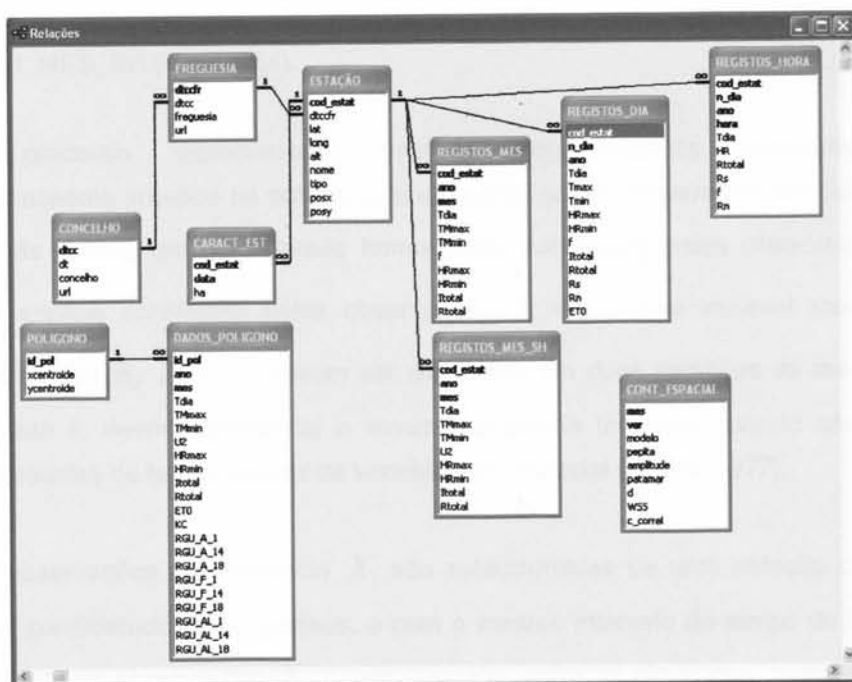


Figura 5.4 - Diagrama de relações da base de dados Microsoft Access.

5.3. Análise da homogeneidade das séries de dados

Considerando um período de vários anos, os dados climatológicos recolhidos numa estação meteorológica podem não ser homogêneos, isto é, os dados de uma determinada variável podem apresentar alterações súbitas em relação à média e variância dos valores originais. Este fenómeno pode ocorrer devido a várias causas, umas relacionadas com mudanças na instrumentação e práticas de observação, outras relacionadas com modificações das condições ambientais no local.

Essas alterações fazem com que as observações efectuadas anteriormente pertençam a uma população estatística diferente da dos dados recolhidos à posteriori. Por conseguinte, tais informações são indispensáveis para a aplicação de técnicas que permitam avaliar se um determinado conjunto de dados pode ser considerado homogéneo ou não e, neste caso, para se introduzirem as correcções apropriadas, sendo para tal inevitável possuir informação local para identificar qual a sub-série de dados a corrigir.

Assim, depois de organizados e armazenados os dados alfanuméricos em base de dados procedeu-se, por programação em *Visual Basic*, ao desenvolvimento de uma aplicação para análise da homogeneidade das séries de dados de todas as variáveis climáticas armazenadas na tabela correspondente aos registos médios mensais amostrados pelas estações (tabela REGISTOS_MES na figura 5.4). A análise foi efectuada para cada mês e para cada estação. Os resultados obtidos foram armazenados na tabela REGISTOS_MES_SH (Figura 5.4).

O processo implementado (método dos resíduos cumulativos) está incontestavelmente provado na prática, e fundamenta-se na comparação estatística de dois conjuntos de dados, um considerado homogéneo, constituído pelas observações X_i , e outro sob análise constituído pelas observações Y_i da mesma variável meteorológica. Ambos os conjuntos, X_i e Y_i , devem ser recolhidos em duas estações da mesma região climática, isto é, devem apresentar a mesma tendência temporal quando são utilizadas pequenas escalas de tempo apesar da variabilidade espacial (HAAN, 1977).

As observações de referência X_i são seleccionadas de uma estação cujos dados podem ser considerados homogéneos, e com o mesmo intervalo de tempo de observação verificado para as observações Y_i . A este respeito, refira-se ainda que, quando para uma região climática não existir informação sobre a homogeneidade dos dados então a média das observações da mesma variável de todas as outras estações, $X_i = \frac{1}{m} \sum X_{i,j}$, pode ser usada para constituir o conjunto de dados homogéneos.

Seguidamente, apresentam-se os principais passos do método de resíduos cumulativos implementado para análise da homogeneidade das séries de dados de todas as variáveis climáticas.

Método dos resíduos cumulativos

Quando se relacionam dois conjuntos de dados climatológicos de duas estações, sendo o primeiro considerado homogéneo, o segundo também o pode ser se não forem influenciados os seus resíduos cumulativos a partir da recta de regressão baseada no primeiro conjunto. A hipótese induzida pode ser testada para uma dada probabilidade p verificando se os resíduos são interiores à elipse de eixos α e β . A magnitude dos eixos depende do tamanho do conjunto de dados, do desvio padrão da amostra que se está a testar e da probabilidade p para testar a hipótese.

O método dos resíduos cumulativos para análise da homogeneidade do conjunto de dados climáticos Y_i , de uma determinada estação meteorológica, pode resumir-se nos seguintes passos:

- 1) Construção do conjunto de dados homogéneos X_i da mesma variável a partir da média das observações (da mesma variável) de todas as outras estações, isto é, para um dado mês determinamos, para cada ano, a média dos valores registados nesse mês em todas as outras estações.
- 2) Organização de ambos os conjuntos de dados, x_i e y_i , por ordem cronológica ($i = 1, 2, \dots, n$).
- 3) Cálculo da média e do desvio padrão dos dois conjuntos de dados.

Conjunto de dados homogéneos X_i

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (5.1)$$

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (5.2)$$

Conjunto de dados a testar Y_i

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (5.3)$$

$$s_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} \quad (5.4)$$

- 4) Cálculo da recta de regressão, entre ambas as variáveis, e do coeficiente de correlação.

Equação de regressão de x_i em relação a y_i

$$\hat{y}_i = a + b x_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (5.5)$$

em que:

$$b = \frac{\text{cov}_{xy}}{s_x^2} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5.6)$$

e

$$a = \bar{y} - b \bar{x} \quad (5.7)$$

Coeficiente de correlação

$$r = \frac{\text{cov}_{xy}}{s_x s_y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5.8)$$

A equação de regressão entre o conjunto integral é então:

$$\hat{y}_i = a_f + b_f x_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (5.9)$$

onde f se refere ao conjunto integral.

- 5) Cálculo do resíduo dos valores observados y_i para a recta de regressão, do seu desvio padrão $s_{y,x}$ e do correspondente resíduo cumulativo E_i :

$$\varepsilon_i = y_i - \hat{y}_i \quad (5.10)$$

$$s_{y,x} = s_y \sqrt{1 - r^2} \quad (5.11)$$

$$E_i = \varepsilon_i + \sum_{j=1}^{i-1} \varepsilon_j \quad (5.12)$$

- 6) Selecção de uma das três probabilidades p consideradas para aceitar a hipótese de homogeneidade. A partir daqui estabelece-se a equação da elipse de eixos:

$$\alpha = \frac{n}{2} \quad (5.13)$$

$$\beta = \frac{n}{\sqrt{n-1}} z_p s_{y,x} \quad (5.14)$$

em que:

n tamanho da amostra sob análise

z_p variação normal padrão para a probabilidade p (Tabela 5.3)

$s_{y,x}$ desvio padrão das estimativas de y (equação 5.11)

A equação paramétrica da elipse é então:

$$\begin{cases} X = \alpha \cos(\theta) \\ Y = \beta \sin(\theta) \end{cases} \text{ com } \theta [\text{rad}] \in [0, 2\pi] \quad (5.15)$$

$$\text{donde } \theta = \arccos\left(\frac{X}{\alpha}\right) \vee \theta = \arcsin\left(\frac{Y}{\beta}\right)$$

p (%)	z_p
80	0,84
85	1.04
90	1,64

Tabela 5.3 - Valores da variação normal padrão z_p para uma dada probabilidade p

O que permitirá concluir se para o nível de probabilidade p considerado, não existe influência na distribuição dos resíduos, isto é, o conjunto de dados y_i é considerado homogêneo, quando E_i é interior à elipse (Equação 5.15).

- 7) Determinação dos resíduos cumulativos E_i em relação ao tempo, usando como escala a unidade de tempo da variável em estudo (Figura. 5.5).

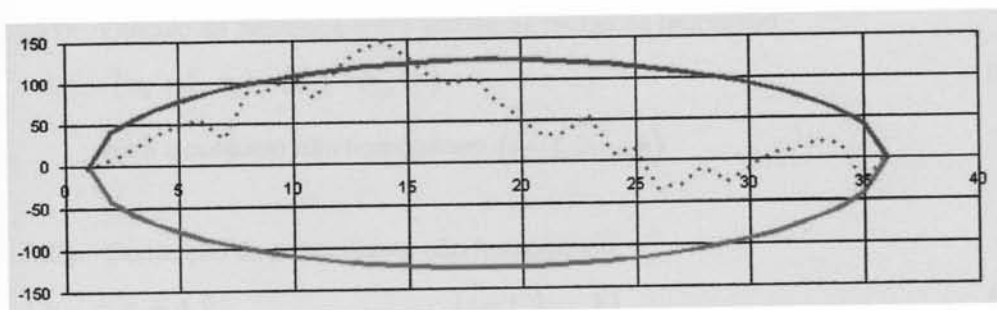


Figura 5.5 - Gráfico dos resíduos cumulativos associado a uma elipse para probabilidade de 80%.

- 8) Desenho da elipse e verificação da interioridade de todos os E_i . Neste caso, a hipótese de homogeneidade é aceita (Figura 5.5).

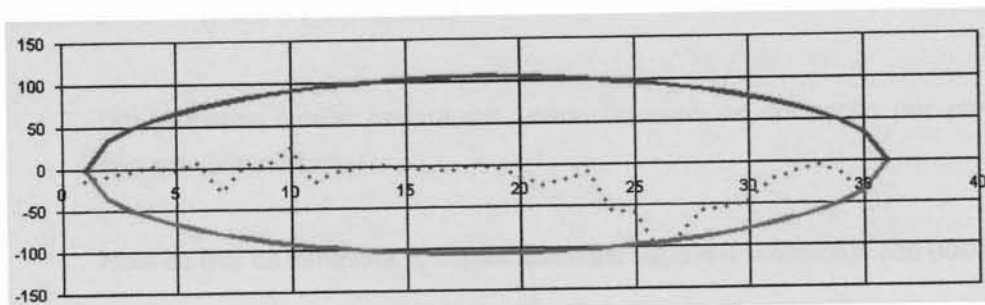


Figura 5.6 - Gráfico dos resíduos cumulativos associado a uma elipse de probabilidade de 80%, depois de corrigida a variável y .

- 9) Se a hipótese de homogeneidade não puder ser aceite (Fig. 5.6), selecciona-se o ponto de quebra, isto é, o ponto de inflexão exterior à elipse de abscissa k onde E_i pára de aumentar (ou diminuir) e começa a diminuir (ou aumentar).
- 10) Subdivisão do conjunto em dois subconjuntos, o primeiro de 1 a k , e o segundo de $k+1$ a n . Calculam-se as equações de regressão para ambos os subconjuntos. Se se admitir que o segundo subconjunto é homogéneo e não o primeiro, tem-se então:

$$\hat{y}_i = a_{nh} + b_{nh} x_i \quad (i = 1, 2, \dots, k) \quad (5.16)$$

$$\hat{y}_i = a_h + b_h x_i \quad (i = k+1, k+2, \dots, n) \quad (5.17)$$

onde h e nh identificam os coeficientes de regressão dos subconjuntos homogéneo e não homogéneo, respectivamente.

- 11) Cálculo da diferença entre ambas as rectas de regressão

$$\Delta \hat{y}_i = (a_h + b_h x_i) - (a_{nh} + b_{nh} x_i) \quad (5.18)$$

para o conjunto não homogéneo ($i = 1, 2, \dots, h$)

- 12) Correção do subconjunto não homogéneo

$$y_{c,i} = y_i + \Delta \hat{y}_i \quad (i = 1, 2, \dots, k) \quad (5.19)$$

onde c identifica os valores correctos. Assim sendo, o conjunto integral homogéneo para a variável climatérica Y é composto por

$$\begin{aligned} Y_i &= y_{c,i} & (i = 1, 2, \dots, k) \\ Y_i &= y_i & (i = k+1, k+2, \dots, n) \end{aligned} \quad (5.20)$$

Um processo similar poderá ser usado no caso de correção por parte do segundo subconjunto.

Note-se que as variáveis Y_i continuam a ser variáveis aleatórias, não obstante a média e a variância terem sido modificadas através da correção introduzida.

Como referido anteriormente, com a análise da homogeneidade das séries de dados corrigiram-se as alterações súbitas, existentes nos dados recolhidos pelas estações,

relacionadas com mudanças na instrumentação, práticas de observação, e modificações das condições ambientais no local.

5.4. Inferência espacial

De acordo com os objectivos inicialmente propostos, tornou-se necessário estimar valores para:

- produção de mapas temáticos; e
- determinação da reserva de água no solo em qualquer localização da região.

Relativamente aos mapas temáticos de todas as variáveis meteorológicas com registos médios mensais, bem como para a evapotranspiração de referência, coeficientes culturais, e reserva de água no solo, efectuou-se uma estimativa de valores para todos os centróides das células da malha subjacente à área da região (secção 5.3.1), a partir dos dados pontuais de localizações conhecidas (estações meteorológicas e postos pluviométricos).

Com o intuito de aproximar tais grandezas de forma realista, foi necessário modelar a sua variabilidade espacial e, sempre que possível, recorrendo-se, à estimação geoestatística.

Refira-se ainda que os resultados obtidos na análise da continuidade espacial que seguidamente se apresentam serviram de base, não só para a inferência de valores necessários à produção de mapas temáticos da série histórica de registos médios mensais, mas também para estimação de valores relativos a registos diários utilizados na determinação da reserva de água no solo ao longo do ciclo vegetativo da cultura da vinha. Neste caso, consoante o mês a que respeita o dia em que é efectuada a determinação recorre-se no processo de cálculo aos modelos de inferência resultantes da análise da continuidade espacial para a série histórica.

5.4.1. Análise da continuidade espacial

Para a caracterização da distribuição espacial, procedeu-se em primeiro lugar à análise estrutural mensal de cada uma das variáveis, com base nos dados da análise da homogeneidade, armazenados em base de dados (tabela REGISTOS_MES_SH na figura 5.4), tendo-se usado o semivariograma como estimador para representar quantitativamente a sua variação.

A criação dos semivariogramas experimentais envolveu a implementação, em *Visual Basic*, de uma aplicação. Esta, após especificação da variável e do mês a analisar, bem como da distância máxima e do número de intervalos amostrais (*lags*) a considerar, estabelece ligação à base de dados e selecciona os dados necessários ao cálculo do semivariograma e geração do respectivo gráfico. A análise do gráfico de semivariograma permite verificar a necessidade de proceder a eventuais ajustes de especificação, nomeadamente no que respeita à distância máxima e número de *lags* considerados. Obtido o semivariograma desejado, a aplicação possibilita o armazenamento dos resultados (distância entre amostras, valor de semivariograma e número de pares envolvidos no cálculo) num ficheiro .xls (*Excel*) com nome e localização especificados pelo utilizador. Todos os resultados foram guardados em ficheiro (.xls) para posterior ajuste a modelos teóricos de semivariograma.

Após a análise estrutural mensal de cada uma das variáveis relativas aos dados climatológicos homogeneizados da série histórica, a partir dos resultados armazenados em ficheiros .xls, cada um dos gráficos de semivariograma foi ajustado por uma função geral e representativa, o que significa ajustá-lo por uma curva atenuada média, função de um número reduzido de parâmetros que quantifique a continuidade espacial da variável. Na tabela 5.3 apresenta-se um exemplo de um extracto de uma das folhas de cálculo utilizadas no ajuste do semivariograma a modelos teóricos.

	Modelo Esférico		Modelo Exponencial		Modelo Gaussiano		Modelo Cúbico		Modelo Dampened Hole	
	Pepita	0	Pepita	0	Pepita	0,1	Pepita	0,1	Pepita	0,1
	Amplitude	50000	Amplitude	80000	Amplitude	45000	Amplitude	60000	Amplitude	44000
	Patamar	3,1	Patamar	3,2	Patamar	3,9	Patamar	3,8	Patamar	500000000
										2,1
Distância	Análise	N.º Pares	Semivariograma Estimado	WSSi	Semivariograma Estimado	WSSi	Semivariograma Estimado	WSSi	Semivariograma Estimado	WSSi
0			0		0		0,1		0,1	
2500	0,179065764	27	0,23230625	2,36636484	0,286366844	9,694977999	0,135944445	1,56575108	0,143776988	1,048604782
7500	0,383773506	53	0,69226875	34,24702396	0,784513274	57,78974467	0,411826783	0,283199902	0,451088119	1,630589329
17500	0,690797627	33	1,56104375	52,37167452	1,53986187	49,85323775	1,522443358	47,82874564	1,565411889	52,89874587
22500	3,34778285	123	1,95125825	21,40370593	1,82369715	25,49231801	2,157770444	15,54152133	2,18286469	14,85297232
27500	2,325912952	213	2,29961875	0,02722154	2,059004852	2,804892142	2,727980007	6,36487187	2,743371306	6,861496946
32500	5,057500362	24	2,59683125	5,681275269	2,254081807	7,374206309	3,184405727	3,291992406	3,201388194	3,232569213
37500	5,237584591	93	2,83356375	19,59234707	2,415806274	26,99396196	3,514393561	10,06671326	3,535165286	9,825483234
42500	6,260024071	123	3,00060625	33,34518848	2,549880567	43,20505088	3,731512084	20,06703179	3,745860729	19,83992758
47500	6,473056701	121	3,08856875	33,07902782	2,65103206	41,96412129	3,862153708	19,88558915	3,854049949	19,80797953
52500	4,703540325	189	3,1	21,96705475	2,753179884	32,49889147	3,934280315	5,055433165	3,893228173	5,609404576
57500	3,992950916	134	3,1	6,701500119	2,829573113	11,37518325	3,970904495	0,004065009	3,899905524	0,07276233
			WSS	230,8	WSS	309,04	WSS	130	WSS	136
			C. Correl.	89,85	C. Correl.	86,99	C. Correl.	91	C. Correl.	91
										123,31
										94,69

Tabela 5.3 - Temperatura média mensal dos máximos diários para o mês de Janeiro.

Foram testados os modelos teóricos apresentados na secção 4.2.3.2: Esférico, Exponencial, Gaussiano, Cúbico e *Dampened Hole*. Os resultados da análise realizada serviram de apoio à decisão do método de estimação a adoptar. De acordo com a tabela 5.3, na figura 5.7 apresentam-se os gráficos correspondentes ao ajuste dos modelos teóricos.

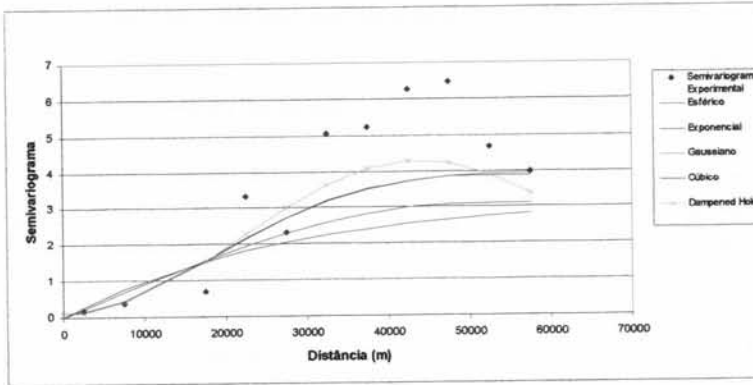


Figura 5.7 - Gráficos do ajuste dos modelos teóricos para a temperatura média mensal dos máximos diários para o mês de Janeiro

Todos os modelos foram ajustados de forma interactiva até que se começasse a perceber o efeito da mudança de cada parâmetro nas curvas e, adquirindo alguma experiência, se pudesse seleccionar o tipo de modelo. Em seguida, seleccionada a curva adequada, os parâmetros foram ajustados de forma a que a soma ponderada dos quadrados das diferenças entre os valores do modelo e do semivariograma experimental seja mínima:

$$WSS = \sum_{i=1}^K \omega(h_i) [g(h_i) - \gamma(h_i)]^2 \quad (5.21)$$

em que:

$$\omega(h_i) = \frac{N(h_i)}{[\gamma(h_i)]^2} \quad (5.22)$$

K - número de intervalos (*lags*);

$N(h_i)$ - número do pares de amostras no cálculo de $\gamma(h_i)$.

Como se pode constatar, os coeficientes de ponderação, $\omega(h_i)$, atribuem maior peso aos valores dos primeiros intervalos e com mais pares de amostras no seu cálculo.

Nas secções seguintes, apresentam-se os resultados obtidos e as opções a adoptadas nos procedimentos inferenciais da estimação.

Temperatura média mensal da temperatura média do dia

Relativamente à temperatura média mensal da temperatura média do dia, com excepção do mês de Julho, todos os modelo teóricos apresentaram coeficientes de

correlação elevados com o semivariograma experimental. No entanto, a curva que melhor se ajustou, e cujas correlações apresentaram melhores resultados, foi a correspondente ao modelo teórico *Dampened Hole*. Na tabela 5.4 é apresentado um resumo dos resultados obtidos com o modelo que melhor se ajustou a cada um dos meses.

Mês	Modelo	Coef. de Correlação	WSS
Janeiro	Dampened Hole	94,69	123,31
Fevereiro	Dampened Hole	89,67	91,72
Março	Dampened Hole	84,78	132,89
Abril	Dampened Hole	82,66	125,72
Mai	Dampened Hole	83,01	136,00
Junho	Dampened Hole	81,44	129,44
Julho	Dampened Hole	63,70	298,47
Agosto	Dampened Hole	80,17	172,19
Setembro	Dampened Hole	82,06	191,65
Outubro	Dampened Hole	87,59	169,09
Novembro	Dampened Hole	91,07	92,17
Dezembro	Dampened Hole	94,62	85,15

Tabela 5.4 - Resultados do modelo teórico que melhor se ajustou para temperatura média mensal da temperatura média do dia.

Temperatura média mensal dos mínimos diários

De uma maneira geral, à semelhança do que se verificou para a temperatura média mensal dos mínimos diários, o modelo teórico que melhor se ajustou ao semivariograma experimental foi o *Dampened Hole* (Tabela 5.5). No entanto, em comparação com a temperatura média mensal da temperatura média do dia, os coeficientes de correlação obtidos não foram tão elevados. Relativamente ao mês de Agosto os resultados não foram satisfatórios, não tendo sido obtido um ajuste representativo da distribuição espacial através dos modelos estudados. Todavia, o modelo que produziu melhores resultados foi o modelo Gaussiano, mas com um baixo coeficiente de correlação com o semivariograma experimental. Por conseguinte, neste caso na estimação de valores optou-se por utilizar o modelo determinista do inverso do quadrado das distâncias.

Mês	Modelo	Coef. de Correlação	WSS
Janeiro	Dampened Hole	87,82	38,91
Fevereiro	Dampened hole	85,94	66,62
Março	Dampened hole	78,50	144,98
Abril	Dampened hole	86,39	111,72
Maio	Dampened hole	73,27	180,44
Junho	Dampened hole	67,06	265,19
Julho	Dampened hole	62,05	246,44
Agosto	Gaussiano	53,58	75,45
Setembro	Dampened hole	70,94	84,18
Outubro	Dampened hole	75,01	89,38
Novembro	Dampened hole	78,63	117,06
Dezembro	Dampened hole	81,31	141,47

Tabela 5.5 - Resultados do modelo teórico que melhor se ajustou para Temperatura média mensal dos mínimos diários.

Temperatura média mensal dos máximos diários

No que concerne à temperatura média mensal dos máximos diários, apesar de todos os modelos testados terem-se apresentado resultados satisfatórios, o modelo que melhor se ajustou ao semivariograma experimental foi o *Dampened Hole*. Para qualquer dos meses os coeficientes de correlação com o semivariograma experimental foram os mais elevados. Na tabela 5.6 é apresentado um resumo dos resultados obtidos.

Mês	Modelo	Coef. de Correlação	WSS
Janeiro	Dampened hole	91,77	41,54
Fevereiro	Dampened hole	87,59	55,97
Março	Dampened hole	78,93	161,04
Abril	Dampened hole	83,62	204,06
Maio	Dampened hole	74,80	208,22
Junho	Dampened hole	73,64	102,94
Julho	Dampened hole	66,39	143,61
Agosto	Dampened hole	71,32	129,93
Setembro	Dampened hole	74,86	117,14
Outubro	Dampened hole	77,04	87,99
Novembro	Dampened hole	87,31	50,93
Dezembro	Dampened hole	86,12	93,21

Tabela 5.6 - Resultados do modelo teórico que melhor se ajustou para Temperatura média mensal dos máximos diários.



Insolação total

No caso da insolação total, o modelo *Dampened Hole* foi a função que melhor se ajustou ao semivariograma. No entanto, apenas com resultados satisfatórios para os meses de Janeiro, Fevereiro, Abril, Junho, Julho e Novembro (Tabela 5.7). Relativamente aos restantes optou-se pelo método do inverso do quadrado das distâncias.

Mês	Modelo	Coef. de Correlação	WSS
Janeiro	Dampened hole	67,85	805,58
Fevereiro	Dampened hole	71,75	146,95
Março	Dampened hole	55,85	59,89
Abril	Dampened hole	88,25	33,53
Maio	Dampened hole	51,25	69,26
Junho	Dampened hole	78,58	32,60
Julho	Dampened hole	71,41	381,05
Agosto	Dampened hole	57,83	361,38
Setembro	Dampened hole	33,80	378,46
Outubro	Dampened hole	59,77	231,90
Novembro	Dampened hole	70,42	123,74
Dezembro	Dampened hole	47,95	424,69

Tabela 5.7 - Resultados do modelo teórico que melhor se ajustou para a insolação total.

5.4.2. Precipitação total

Conforme se pode observar na tabela 5.8, relativamente à precipitação, à excepção dos meses de Julho e Agosto, foram obtidos bons resultados no processo de ajuste dos modelos teóricos ao semivariograma experimental. Os modelos Cúbico e Gaussiano revelaram-se bastante adequados. Relativamente aos meses de Julho e Agosto, pelos resultados obtidos, optou-se pelo método do inverso do quadrado das distâncias para o processo de inferência espacial.

Mês	Modelo	Coef. de Correlação	WSS
Janeiro	Cúbico	86,09	581,52
Fevereiro	Cúbico	92,10	487,14
Março	Cúbico	84,20	1121,27
Abril	Gaussiano	96,49	121,03
Maio	Cúbico	92,31	202,65
Junho	Cúbico	88,54	250,72
Julho	Dampened hole	1,40	560,95
Agosto	Dampened hole	15,43	399,40
Setembro	Gaussiano	86,25	261,37
Outubro	Cúbico	87,50	410,06
Novembro	Cúbico	91,94	481,38
Dezembro	Cúbico	91,93	308,39

Tabela 5.8 - Resultados do modelo teórico que melhor se ajustou para a precipitação total.

Sempre que foi possível obter modelos de semivariograma que traduzem a interpretação da estrutura de correlação espacial a ser utilizada nos procedimentos inferenciais da estimação geoestatística (Krigagem), foram armazenados em base de dados os respectivos parâmetros. Ou seja, extensão da continuidade (amplitude), valor onde o semivariograma se estabiliza (patamar) e o valor do efeito de pepita. Relativamente aos casos em que o modelo adoptado foi o *Dampened Hole*, além destes, foi necessário guardar também o valor da distância em que o modelo atinge 95% do efeito de "buraco" (*hole*).

Relativamente às variáveis humidade relativa média mensal dos máximos diários e média mensal dos mínimos diários, e velocidade do vento média mensal o ajuste dos modelos teóricos aos gráficos de semivariograma não produziram resultados satisfatórios. Para estas variáveis optou-se pelo método do inverso do quadrado das distâncias para o processo de inferência espacial.

5.4.3. Estimação

Depois de determinados os modelos teóricos de semivariograma, para todos os meses do ano e para todas as variáveis e após os resultados (tipo de modelo e respectivos parâmetros) terem sido devidamente guardados em base de dados, para a produção dos mapas temáticos representativos da distribuição espacial mensal de cada fenómeno, de forma automática e realista, tornou-se necessário efectuar previamente a estimação e armazenamento de valores para todas as células da malha regular considerada para a região. Por não se verificar grande variação nos valores, optou-se por aproximar a área de cada célula ao valor estimado para o seu centróide.

Por conseguinte, foi implementada, em *Visual Basic*, uma aplicação cuja funcionalidade se resume nos passos seguintes:

- 1) Ligação à base de dados.
- 2) Após selecção e validação da variável a estimar, são apresentados os anos e meses em que existe registo de informação. Cabe então ao utilizador optar por efectuar o processo de cálculo para:
 - todos os meses de todos os anos;
 - todos os meses de um determinado ano;
 - um determinado mês de todos os anos; ou
 - um determinado mês de um ano.
- 3) No processo de cálculo é consultada a tabela com os registos dos modelos teóricos adoptados e respectivos parâmetros para cada mês de cada variável (Figura 5.8). Caso exista, na tabela, registo para o mês e variável a inferir é efectuada a estimação geoestatística (krigagem) para todos os centróides das células da malha, mediante o modelo de variograma correspondente. Caso contrário, isto é, se não existir registo para o mês e variável em causa, é adoptado, no processo de interpolação, o modelo determinístico do inverso do quadrado das distâncias.

Mês	var	modelo	pepita	amplitude	patamar	d	WSS	c. correl.
1	Rtotal	DAMP	20	41000	100	1000000000	805,58	67,85
1	Rtotal	CUB	800	45000	4100		581,52	86,09
1	Tdia	DAMP	0	45000	2,2	130000000	125,49	94,63
1	Ttrmin	DAMP	0,1	42000	4,2	900000000	41,54	91,77
1	Ttrmin	DAMP	0,6	45000	1,3	930000000	38,91	87,82
2	Hrmin	DAMP	45	25000	16	150000	13,88	68,48
2	Rtotal	DAMP	0	45000	56	9500000	146,95	71,75
2	Rtotal	CUB	100	40000	9200		487,14	92,1
2	Tdia	DAMP	0	45000	3,2	130000000	91,72	89,67
2	Ttrmin	DAMP	0,2	40000	5,5	1100000000	55,97	87,59
2	Ttrmin	DAMP	0,5	45000	1,65	140000000	66,66	95,94
3	Rtotal	DAMP	30	65000	70	1300000000	59,89	55,85
3	Rtotal	CUB	100	45000	1550		1121,27	84,2
3	Tdia	DAMP	0	40000	3,1	130000000	132,89	84,78

Figura 5.8 - Extracto da tabela CONT_ESPACIAL.

- 4) Por fim, os valores inferidos são armazenados em base de dados numa tabela com os dados associados a cada célula da malha (Figura 5.9).

id_pol	Ano	Mês	Tdia	TMmax	TMmin	Vel. do Vento	HRmax
112	1976	7	21,89777	26,36031	15,33643	1,268912	73,56723
112	1976	8	18,98234	26,04688	14,20564	1,13915	79,26086
112	1976	9	15,37369	24,11876	10,18202	1,123006	81,96275
112	1976	10	13,9917	14,99096	15,40294	1,191256	88,96453
112	1976	11	7,560522	11,90142	3,460091	1,174676	86,1189
112	1976	12	7,57122	10,72076	4,674281	1,564969	88,41229
112	1977	1	8,624568	9,735689	3,33135	1,545681	86,58141
112	1977	2	10,56533	10,86516	4,963158	1,583108	93,62222
112	1977	3	12,07275	17,36506	5,265949	1,283442	83,40575
112	1977	4	13,37377	16,65947	6,895916	1,311092	78,89107
112	1977	5	13,63692	16,88858	6,966583	1,215171	80,91684
112	1977	6	15,22683	19,61016	9,67143	1,268977	79,19068
112	1977	7	18,53325	22,16552	13,16186	1,301364	76,40777
112	1977	8	16,84612	25,07367	12,02468	1,208457	79,09614
112	1977	9	19,71602	28,248	13,88457	1,006227	81,63216
112	1977	10	16,21745	16,25099	9,923919	1,082793	88,1191
112	1977	11	8,777265	10,07709	4,93624	1,111709	86,1191

Figura 5.9 - Extracto da tabela DADOS_POLIGONO.

5.5. Sumário

Neste capítulo, foram apresentadas e descritas todas as etapas precedentes e subjacentes à implementação do local Web.

Numa primeira fase procedeu-se à recolha e armazenamento da Informação necessária. Seguiu-se, para cada mês e para todas as variáveis da série histórica de dados climatológicos, uma análise da homogeneidade. Posteriormente, com base nos dados obtidos, efectuou-se a análise da continuidade espacial mensal para cada variável meteorológica. Por fim, de acordo com os resultados do ajuste de modelos teóricos aos gráficos de semivariogramas decidiu-se o método de estimação a adoptar no processo de inferência espacial.

6. Local Web - GISDao

Efectuada a recolha, armazenamento e tratamento da informação subjacente ao problema inicialmente proposto, neste capítulo é apresentada a arquitectura e componentes da ferramenta GIS utilizados de suporte ao desenvolvimento do protótipo, bem como as funcionalidades e componentes da aplicação Web implementada.

6.1. Arquitectura do protótipo

A publicação de dados georeferenciados na a Web é um método de comunicação poderoso e efectivo mas envolve conhecimento de várias tecnologias.

Em termos de arquitectura, como é ilustrado na figura 6.1, pode considerar-se que o protótipo desenvolvido é constituído por quatro unidades funcionais: aplicação Web, servidor de mapas, bases de dados espaciais e alfanuméricas, e aplicações *stand-alone*, implementadas em *Visual Basic*, que geram dados necessários à base de dados alfanumérica.

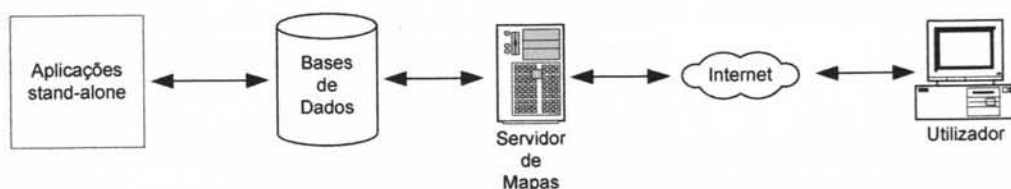


Figura 6.1 - Arquitectura do protótipo.

Quando o utilizador a partir de um *browser* Web efectua um pedido de acesso à página da aplicação Web, com um mapa embutido, este é enviado ao respectivo computador anfitrião (*host*) - servidor de mapas. Por sua vez, o servidor de mapas processa o pedido, interpreta-o e determina os dados a fornecer. De acordo com as especificações do pedido, envia os dados necessários a partir da fonte de dados espacial ou alfanumérica (Figura 6.1).

Nas secções seguintes apresentam-se as componentes da ferramenta GIS de suporte ao desenvolvimento deste protótipo, bem como a aplicação Web e aplicações *stand-alone*.

6.2. Autodesk MapGuide

A ferramenta GIS utilizada de suporte à implementação do protótipo foi o *Autodesk MapGuide*.

Com o *Autodesk MapGuide* é possível desenvolver, gerir, manter e publicar aplicações GIS para a Internet ou Intranet. Para desenvolver uma aplicação Web com esta ferramenta são necessários, pelo menos, os seguintes componentes: *Autodesk Mapguide Viewer*, *Autodesk Mapguide Author* e *Autodesk Mapguide Server*.

O *Autodesk MapGuide Author* é usado para criar mapas interactivos que combinam recursos de dados, tais como dados cartográficos (ficheiros de dados espaciais e ficheiros de imagens *raster*) e dados alfanuméricos (de bases de dados) num ficheiro de mapa (*Map Windows File* - MWF). Para publicar um mapa na Web, basta torná-lo acessível ao servidor Web. O ficheiro MWF correspondente pode então ser embutido numa página Web ou nesta existir uma hiperligação para o ficheiro. O MWF contém as especificações necessárias à visualização do mapa e suas funcionalidades.

Por sua vez, o utilizador para visualizar um mapa a partir de um *browser* Web precisa ter instalado no seu computador o *Autodesk MapGuide Viewer*. Quando o utilizador abre uma página Web que contém um ficheiro MWF ou selecciona uma ligação para um ficheiro MWF, o *browser* Web carrega automaticamente o *Autodesk MapGuide Viewer* que permite visualizar o mapa de acordo com as configurações do ficheiro MWF especificadas no *Autodesk MapGuide Author*.

Por fim, o *Autodesk MapGuide Server* tem como função responder a pedidos de informação gerados pela interacção dos utilizadores com a aplicação. Quando se utiliza o

Autodesk MapGuide Author para criar um mapa ou o *Autodesk MapGuide Viewer* para o visualizar, são enviados pedidos ao *Autodesk MapGuide Server* para este fornecer os dados necessários à visualização do mapa através da Internet, intranet, ou extranet, e usando os serviços de um servidor e *browser* Web.

Nas secções seguintes descrevem-se as funcionalidades dos componentes *Autodesk MapGuide* utilizados no desenvolvimento deste trabalho.

6.2.1. Componentes de visualização de mapas

O *Autodesk MapGuide Viewer* apresenta um mapa num *browser* de Web quando o utilizador abre uma página que contém um ficheiro MWF ou quando clica numa hiperligação para um ficheiro MWF.

O *Autodesk MapGuide Viewer* está disponível em três versões:

- Plug-In para o browser Web Netscape Navigator em sistemas Windows;
- controlo ActiveX para o *browser* Web *Microsoft Internet Explorer* em sistemas de Windows, e
- edição Java para o browser Web Netscape Navigator em sistemas Sun e Solaris, e com o Microsoft Internet Explorer em sistemas Apple Macintosh.

Refira-se ainda que é possível desenvolver aplicações C++, *Visual Basic* ou *Java* que são anfitriões do *Autodesk MapGuide Viewer* sem que para tal se necessite de um *browser* Web para visualização de mapas.

6.2.2. Comonentes do servidor de mapas

Seguidamente, descrevem-se os componentes de *software* que processam e servem dados aos mapas: Servidor Web e *Autodesk Mapguide Server*.

6.2.2.1. Servidor Web

Um Servidor Web é um *software* de aplicação que corre num computador anfitrião (*host*), e que, em resposta a pedidos de outros computadores, processa e envia vários tipos de ficheiros, tais como páginas Web e *Map Window Files* (MWF's).

Quando o utilizador solicita um mapa, o pedido é recebido pelo servidor Web e transferido para o *Autodesk MapGuide Server*, que suporta dois tipos de servidores Web, o

Microsoft Internet Information Server (IIS) e o *Netscape Enterprise Server* (NES). O IIS recorre a interfaces CGI e ISAPI (*Internet Server Application Programming Interface*), e o NES a interfaces NSAPI (*Netscape Server API*).

O servidor de mapas do local Web desenvolvido utiliza como servidor Web o IIS.

6.2.2.2. Autodesk Mapguide Server

Como foi referido anteriormente, o *Autodesk MapGuide Server* responde a pedidos de mapas, quando um utilizador está a visualizá-los a partir do *Autodesk MapGuide Author* ou *Autodesk MapGuide Viewer*. Ao interpretar cada pedido, determina os dados a fornecer, e envia-os a partir da fonte de dados espacial, ficheiro de imagem, ou fonte de dados OLE DB, de acordo com as especificações do pedido.

No que concerne a segurança, o *Autodesk MapGuide Server* permite controlar o acesso às fontes de dados através da identificação de utilizadores e verificação de *passwords*, bem como outras definições opcionais especificadas.

O *Autodesk MapGuide Server* consiste em três componentes: *MapAgent*, *Server Service*, e *Server Admin*, que se resumem seguidamente.

MapAgent

O *Autodesk MapGuide Server Agent* (ou *MapAgent*) é a interface, entre o Servidor Web e o *Autodesk MapGuide Server*, que recebe os pedidos de mapas (do *MapGuide Author* ou do *Autodesk MapGuide Viewer*) a partir do Servidor Web e que, gerindo-os em FIFO (*First In First Out*), reencaminha-os para o *Autodesk MapGuide Server*.

De acordo com o Servidor Web utilizado, existem três tipos de ficheiros *MapAgent* que podem ser usados com o *Autodesk MapGuide Server*: CGI, ISAPI e NSAPI.

CGI

Funciona com qualquer tipo de Servidor Web e é de fácil instalação. No entanto, é o *MapAgent* mais lento porque não é executado em separado do servidor Web.

ISAPI

O ISAPI é uma extensão do servidor que pode ser carregada pelo *Microsoft Internet Information Server* (IIS), ou seja, uma API na forma de DLL (*Dynamic Link Library*) que estende as capacidades do IIS, constituindo uma alternativa ao CGI. Como corre

como uma parte do processo do servidor Web, melhora o desempenho eliminando o *overhead* das comunicações entre o servidor Web e uma interface CGI. O *MapAgent* ISAPI reside no computador do utilizador, sendo assim mais rápido que o *MapAgent* CGI. É de fácil instalação mas apenas pode ser instalado em servidores IIS.

NSAPI

Similar ao ISAPI mas relativamente ao servidor Web - *Netscape Enterprise Server*. Tal como o ISAPI é mais rápido que o *MapAgent* CGI.

Refira-se ainda que, o *Autodesk MapGuide MapAgent* usa RPC's (*remote procedure calls*) para reencaminhar os pedidos de mapas para o *Autodesk MapGuide Server*. Como as chamadas RPC podem ser efectuadas em rede, não é necessário que o *MapAgent* resida no mesmo servidor que o *Autodesk MapGuide Server*. Esta característica permite publicar mapas mantendo seguros numa LAN privada os dados subjacentes, o *Autodesk MapGuide Server* e a comunicação entre eles.

Pelo exposto, e dado que no local Web desenvolvido é usado o IIS como Servidor Web, optou-se por instalar como *MapAgent* o ISAPI.

Server Service

O *Autodesk MapGuide Server Service* é um serviço Windows NT/2000 que recebe e processa os pedidos do *MapAgent* para dados cartográficos distribuídos, formata os dados conforme os pedidos das *layers*, enviando-os em seguida, via Web, para o *Autodesk MapGuide Author* ou para o *Autodesk MapGuide Viewer*.

Autodesk MapGuide Server Admin

O *Autodesk MapGuide Server Admin* concede um controlo operacional completo sobre o *Autodesk MapGuide Server*, permitindo estabelecer políticas de segurança, produzir ficheiros *log*, configurar o acesso às bases de dados, integrar com o Servidor Web, iniciar e parar o servidor.

6.2.3. Aplicações Autodesk MapGuide

Como referido anteriormente, uma aplicação *Autodesk MapGuide* pode ser simplesmente uma página HTML com um mapa embutido (MWF), ou algo mais complexo como uma aplicação que modifica ficheiros de dados no servidor e actualiza os *browsers* de

todos os clientes que estão a visualizar o mapa. No protótipo desenvolvido, tal como geralmente acontece, temos uma combinação das duas situações, um mapa embutido numa página Web com botões e outros controlos de interacção com o mesmo (Figura 5.3).

As aplicações *Autodesk MapGuide* podem ser clientes ou servidoras. Isto é, uma aplicação cliente é executada no *browser* do utilizador, recorrendo ao poder de processamento do computador local (cliente). Tipicamente é uma página HTML que é o hospedeiro do *Autodesk MapGuide Viewer* e possui o código fonte para aceder aos objectos da API do *Autodesk MapGuide Viewer*. Por sua vez, uma aplicação servidora é executada num computador remoto (servidor) e é habitualmente usada para gerar relatórios de mapas personalizados, páginas dinâmicas e actualizar recursos (por exemplo, bases de dados, GIS, ou ficheiros CAD).

6.2.3.1. Aplicações cliente

Geralmente, uma aplicação cliente é constituída pelos seguintes componentes:

- ❑ *Browser* Web e página HTML para alojamento do *Autodesk MapGuide Viewer*,
- ❑ Ficheiro MWF interpretado pelo *Autodesk MapGuide Viewer* e visualizado como um mapa; e
- ❑ *Scripts* para aceder às API's dos *browsers* e *Autodesk MapGuide Viewer*.

Páginas HTML

Usualmente, uma aplicação cliente é uma instância do *Autodesk MapGuide Viewer* visualizada numa página HTML com recurso às tags <EMBED> (para o *plug-in* do *Netscape Navigator*), <OBJECT> (para o controlo ActiveX para o *Microsoft Internet Explorer*), ou <APPLET> (para a edição *Java*). A página HTML pode ainda conter elementos de formulários (tais como botões ou caixas de listagem) e código para aceder às API's do *browser* e *Autodesk MapGuide Viewer*. Também é possível visualizar um mapa em *full-screen* usando a tag <A HREF> em HTML com um *link* para o ficheiro MWF.

Em termos de *scripts* HTML o *Autodesk MapGuide* suporta as seguintes linguagens:

JavaScript

Linguagem que suporta o *Netscape Plug-In* na plataforma *Windows*, bem como a edição *Java* nas plataformas *Windows* e *Sun Solaris*.

JScript

É uma variante *Microsoft* da linguagem *JavaScript*. Suporta o controlo *ActiveX*, assim como a edição *Java* para o *Internet Explorer* em plataformas *Windows*.

VBScript

Linguagem derivada do *Visual Basic* que suporta o controlo *ActiveX* para o *Internet Explorer* em plataformas *Windows*.

Por conseguinte, podem usar-se estas linguagens de criação de *scripts* para aceder às API's do *Autodesk MapGuide Viewer*, bem como dos *browsers* Web, *Netscape* e *Internet Explorer*.

API do Autodesk MapGuide Viewer

O *Autodesk MapGuide Viewer* possui uma interface de programação orientada por objectos (API) que nos permite aceder às suas funcionalidades a partir de um *script* ou aplicação *stand-alone* que aloje o *viewer*. O diagrama da figura 6.2 ilustra o modelo de objectos da API do *Autodesk MapGuide Viewer*.

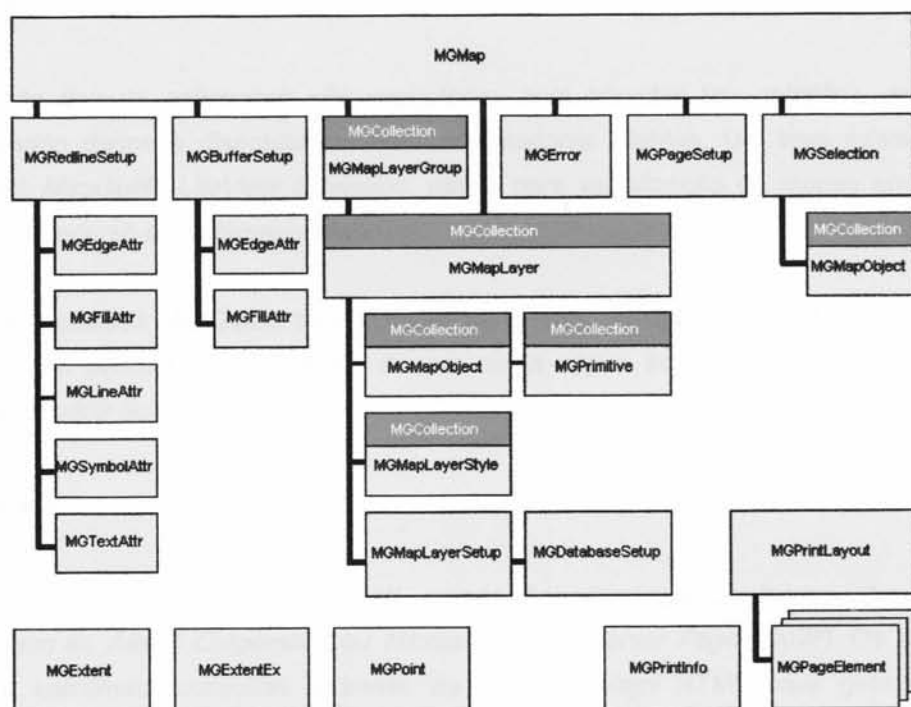


Figura 6.2 - Modelo de objectos da API do *Autodesk MapGuide Viewer*.

API's dos *Browsers* Web

As API's do *Netscape* e *Internet Explorer* permitem o acesso, através de programação, a documentos e funcionalidades do *browser* Web. As API's incluem um *Document Object Model* (DOM) que define a estrutura lógica dos documentos (HTML e XML) e a forma de acesso e manipulação.

Com recurso às API's dos *browsers* é possível escrever *scripts* para gerar dinamicamente páginas HTML.

Refira-se ainda que os DOM's dos dois principais *browsers* apresentam ligeiras variações.

Aplicações *Stand-alone*

É possível desenvolver aplicações *stand-alone* em C++, *Visual Basic* e *Java* que executam o *Autodesk MapGuide Viewer* sem recurso a um *browser* Web.

6.2.3.2. Aplicações servidoras

Este tipo de aplicações são executadas num servidor (ou anfitrião), gerando e processando dados a disponibilizar aos computadores clientes. Um bom exemplo, é o *Autodesk MapGuide LiteView Extension*, usado para visualização de mapas em formato *raster* sem recurso a um *browser* Web.

No *Autodesk MapGuide*, as aplicações servidoras são tipicamente usadas para gerar relatórios ou permitir que os dados de um mapa sejam actualizados no servidor pelo utilizador a partir do seu *browser*.

Relatórios

Um relatório é uma página HTML gerada dinamicamente por ferramentas, como o *ColdFusion* da *Allaire Corporation* ou *Microsoft Active Server Pages* (ASP). Os *scripts* de relatório combinam consultas a bases de dados e *tags* HTML para gerar páginas dinamicamente no servidor que são enviadas para o *browser* Web dos clientes em HTML *standard*.

Numa aplicação *Autodesk MapGuide*, tipicamente, os relatórios apresentam informações sobre uma característica seleccionada ou ponto especificado num mapa pelo

utilizador, dependendo das configurações especificadas no ficheiro MWF. Quando o utilizador visualiza um relatório, o *Autodesk MapGuide Server* envia a informação da característica ou ponto ao *script* do relatório, que extrai da base de dados os conteúdos apropriados, sendo então gerada a página HTML a ser apresentada como resultado no *browser* Web do utilizador.

Actualização de recursos

Como anteriormente referido, podemos desenvolver aplicações servidoras que permitem ao utilizador actualizar recursos associados a um mapa a partir de um *browser* Web. Estes recursos podem ser bases de dados de *layers*, dados alfanuméricos associados com uma característica, ou mesmo os ficheiros de dados espaciais (*Spatial Data File* - SDF), o formato nativo do *Autodesk MapGuide Author*. O mecanismo de actualização de bases de dados é idêntico ao usado para os relatórios.

6.3. Aplicação Web

Na aplicação Web desenvolvida o utilizador tem disponíveis para a Região Demarcada do Dão, resumidamente, os seguintes serviços:

- ☐ Consultar os dados meteorológicos de um estação;
- ☐ Visualizar mapas temáticos de fenómenos meteorológicos e agronómicos; e
- ☐ Determinar a reserva de água no solo ao longo do ciclo vegetativo da cultura da vinha Simular a reserva de água no solo num local da região.

Na consulta dos dados meteorológicos, o utilizador obtém uma tabela com informação relativamente aos registos de cada estação para períodos horários, diários ou mensais. Em qualquer das opções pode especificar o período de tempo desejado.

O aplicação Web permite visualizar, imprimir ou exportar, mapas temáticos relativos aos seguintes elementos climatológicos: temperatura (média mensal dos máximos diários, média mensal dos mínimos diários e média mensal da temperatura média do dia), humidade relativa (média mensal dos máximos diários e média mensal dos mínimos diários), precipitação, insolação e velocidade do vento média mensal. Além disso, é possível obter também mapas temáticos da evapotranspiração de referência, coeficiente cultural e reserva de água no solo para os três tipos de solo característicos da região (solo com textura arenosa, franca e argilo-limosa) a três níveis de espessura de solo (1m; 1,4m e 1,8m). Em

qualquer dos casos podem ser apresentados mapas temáticos mensais para todos os anos armazenados em base de dados.

Relativamente às reservas de água no solo a aplicação permite para uma dada localização da região determinar a reserva de água no solo para a cultura da vinha ao longo do seu ciclo vegetativo. Esta é realizada com base nos registos diários das estações e mediante especificação do dia de início do ciclo da cultura, bem como do tipo de textura do solo e respectiva espessura. Neste caso, é possível visualizar um gráfico com a evolução das reservas de água no solo durante o ciclo vegetativo da cultura, para além da informação correspondente apresentada numa tabela.

6.3.1. Aplicação cliente

A janela principal de acesso ao local Web está subdividida em três zonas que, em termos de página HTML, correspondem a *frames*.

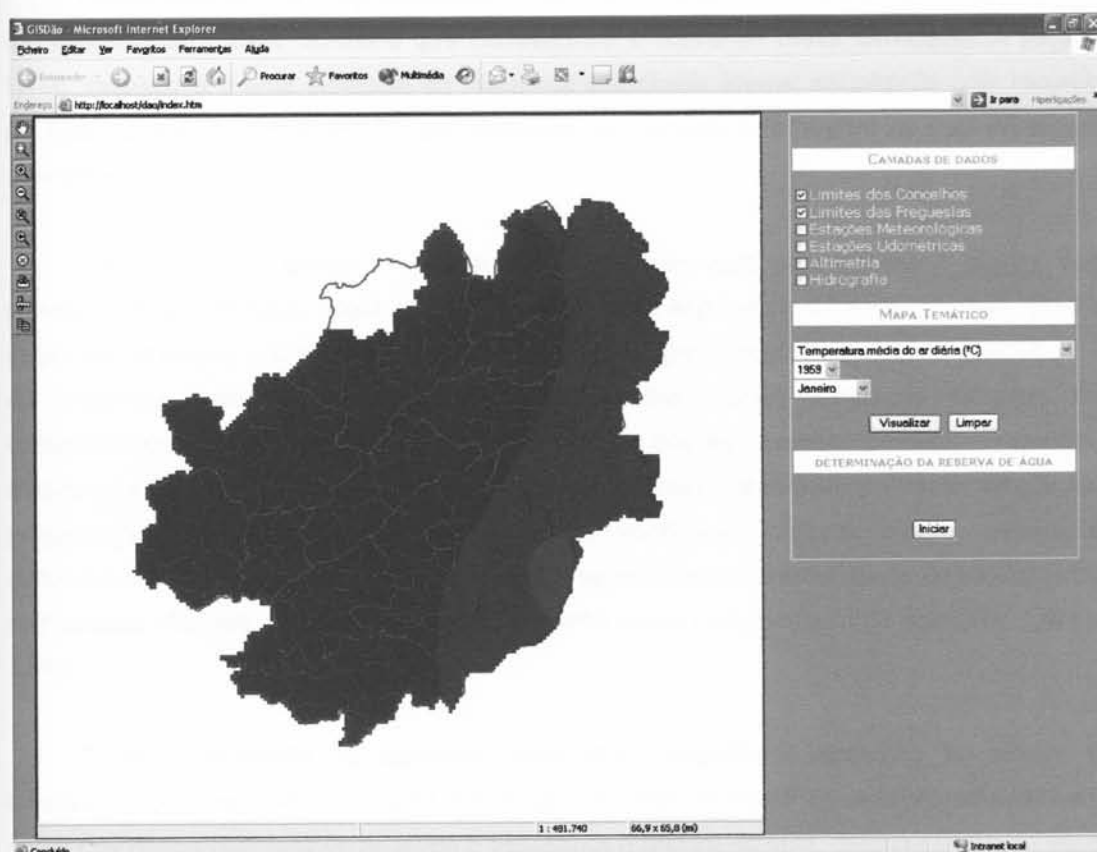


Figura 6.3 - Janela principal da aplicação cliente.

Na *frame* da esquerda é disponibilizado um conjunto de botões cujas acções respeitam aos comandos mais usais em operações com mapas, entre outras, impressão,

zoom, copiar a para a área de transferência, e medir distâncias. Em termos de implementação, a página HTML subjacente contém o código fonte, em *JavaScript*, de acesso aos objectos da API's do *Autodesk MapGuide Viewer* e *browser Web*, que permitem controlar as acções desencadeadas aquando do evento clique nos botões.

Por exemplo, aquando do evento clique no botão relativo à impressão do mapa visualizado é executada uma função *JavaScript* que, resumidamente:

- 1 - Através do DOM do *browser Web* acede ao elemento HTML correspondente ao mapa;
- 2 - Executa o método *IsBusy* do objecto *MGMap* da API do *Autodesk MapGuide Viewer*, para verificar se este está ou não com alguma tarefa em curso.
- 3 - Consoante o tipo de resposta obtido é apresentada uma caixa de diálogo a notificar o utilizador para aguardar ou executa o método da API do *Autodesk MapGuide Viewer* que permite imprimir o mapa.

Relativamente à apresentação de informação cartográfica, reservou-se exclusivamente a zona central a que corresponde a *frame* de maior dimensão. A página HTML respectiva é uma instância do *Autodesk MapGuide Viewer* visualizada com recurso às tags *<EMBED>* e *<OBJECT>*, por questões de compatibilidade com os dois principais *browsers Web*.

Por fim, o lado direito da janela principal é reservado para acesso a alguns dos serviços disponibilizados. Nesta zona o utilizador pode especificar a informação que deseja visualizar no mapa, nomeadamente limites administrativos da região ao nível do concelho ou da freguesia, altimetria e hidrografia, assim como mapas temáticos relativos ao comportamento espacial, para um dado ano e mês, dos fenómenos: temperatura (média, mínima e máxima), humidade relativa (mínima e máxima), velocidade do vento, insolação, precipitação, evapotranspiração de referência, coeficiente cultural, evapotranspiração cultural e reserva de água no solo para os três tipos de solo característicos da região (solo com textura arenosa, franca e argilo-limosa) a três níveis de espessura de solo (1m; 1,4m e 1,8m).

É ainda facultado ao utilizador especificar, através de selecção no mapa, a localização de uma cultura, e após introdução da data de início do ciclo vegetativo, bem como dos dados pedológicos relativos à espessura e textura do solo, determinar desde essa data a evolução das reservas de água no solo. Neste caso, a informação é apresentada quantitativamente e graficamente, permitindo-lhe assim analisar o estado da cultura em termos de disponibilidade de água no solo.

A página HTML relativa a esta *frame*, para além das *tags* necessárias à apresentação dos controlos de interacção com o utilizador, possui o conjunto de funções em *JavaScript* necessárias à interacção com os objectos das API's do *browser* Web e *Autodesk MapGuide Viewer* de forma a desencadear as acções especificadas pelo utilizador. Refira-se ainda que, enquanto que a informação referente aos limites administrativos, altimetria e hidrografia corresponde a *layers* estáticas, as *layers* relativas aos mapas temáticos são geradas dinamicamente. Isto é, especificada a variável, ano e mês a mapear, através da API do *Autodesk MapGuide Viewer* é enviada a instrução SQL necessária para que o *MapGuide Server*, aquando da interpretação do pedido, consiga devolver a fonte de dados OLE DB necessária ao mapeamento das células da *layer* que corresponde à malha subjacente à região.

6.3.2. Aplicações Servidoras

Como foi referido anteriormente, uma aplicação servidora é geralmente usada para gerar relatórios de mapas personalizados, páginas dinâmicas e actualizar recursos.

Assim, para apresentação de conteúdos associados a características dos mapas aquando da sua selecção, foi necessário implementar *scripts* para gerar dinamicamente, a partir do servidor, páginas HTML que são o resultado de consultas à base de dados e/ou processamento de algoritmos para fornecimento de resposta adequada. A este respeito temos duas situações distintas.

Na primeira, quando o utilizador selecciona uma dada estação (meteorológica ou udométrica) é gerada uma página para especificação do tipo de registos associados que pretende consultar, isto é, se relativamente às variáveis amostradas deseja obter dados acerca dos registos horários, diários ou mensais. Note-se que esta funcionalidade só é possível se estiver presente no mapa visualizado a(s) *layer(s)* com a localização geográfica das estações, já que são estas características que permitem estabelecer a ligação com a base de dados que contem os dados alfanuméricos associados.

Outro tipo de resposta diz respeito à apresentação da informação subjacente aos resultados do processo de cálculo de simulação, para períodos diários, da reserva de água utilizável no solo para a cultura da vinha. Este processo é efectuado com base no formalismo apresentado no capítulo 3 e na estimação de valores, fundamentada no capítulo 4. Assim, após selecção do botão de comando "Iniciar", disponível no lado direito da interface, o utilizador especifica (no mapa) a localização da sua cultura, sendo-lhe em seguida apresentada uma página para introdução da data de início do ciclo vegetativo, bem como a espessura e textura do solo. Seguidamente, após validação dos dados, é iniciado o

processo de cálculo, ou seja, são estimados para a localização indicada os dados referentes à reserva de água no solo desde o início da cultura e durante o seu ciclo vegetativo. Esta informação é apresentada ao utilizador através de um gráfico e tabela com os níveis diários de água no solo ao longo do ciclo vegetativo. Refira-se ainda que, a representação gráfica da informação reveste-se de grande importância para uma análise fácil e rápida relativamente à capacidade de utilização de água por parte da planta, uma vez que, com a apresentação no gráfico da linha correspondente ao limiar do seu rendimento óptimo, facilmente se analisa se a cultura consegue ou não com dificuldade obter água para as suas necessidades, bastando para tal analisar o posicionamento da reserva em relação a esse limite. Desta análise, o utilizador poderá induzir a necessidade ou não de rega.

6.4. Aplicações stand-alone

Para o cálculo e armazenamento da evapotranspiração de referência para períodos diários, necessária para determinação da reserva de água no solo, com o intuito de evitar a redundância de cálculo sempre que o utilizador opta por efectuar uma simulação da reserva de água utilizável ao longo do ciclo vegetativo da cultura cuja localização selecciona no mapa, optou-se por implementar uma aplicação, em *Visual Basic*, que é executada em segundo plano e do lado do servidor mediante calendarização preestabelecida.

Por conseguinte, com base nos dados armazenados para cada estação ao longo de cada dia, esta aplicação determina e armazena os registos diários correspondentes a cada uma das variáveis e, a partir destas, determina e regista também a evapotranspiração de referência (ET_0) respectiva, segundo o método de Penman-Monteith modificado (secção 3.5).

Mais especificamente, após estabelecida ligação à base de dados, para cada estação, verifica qual o dia do ano correspondente ao último registo diário de cálculo efectuado, e seguidamente filtra, na tabela REGISTOS_HORA, todos os registos relativos aos dados de dias completos a partir dessa data e procede para cada um deles à determinação e armazenamento (na tabela REGISTOS_DIA) dos respectivos registos diários e ET_0 .

7. Conclusões e desenvolvimentos futuros

Com o processo de globalização económica que se tem vindo a verificar e as mudanças na política agrícola, é cada vez mais necessário aos sectores produtivos elevados níveis de competitividade. No entanto, em alguns, a falta de conhecimentos locais tem como consequência uma inadequada utilização das tecnologias. Assim, para um desenvolvimento sustentável, é fundamental a adopção de tecnologias avançadas, com o intuito de diminuir as diferenças verificadas entre a produtividade experimental e real.

Neste contexto, no que respeita à agricultura, é essencial a utilização das tecnologias considerando a incorporação da variabilidade espacial e temporal dos factores que afectam os processos produtivos, relevando-se assim, pelas suas características, os Sistemas de Detecção Remota, Sistemas de Informação Geográfica (GIS) e Sistemas de Posicionamento Global (GPS).

Com a crescente popularização dos GIS's é cada vez maior a tendência ao desenvolvimento de sistemas espaciais. Porém, infelizmente, não existe ainda literatura que aborde globalmente os métodos de análise espacial que possam ser considerados relevantes e apropriados para GIS, e estes, apesar do crescente recurso a análises de séries temporais de dados, não estão suficientemente preparados para o seu manuseamento.

Por conseguinte, tal como se verificou na elaboração do trabalho a que esta dissertação se refere, a adequação das tecnologias a áreas da agricultura, tais como a

viticultura, requer para além da capacidade científica um correcto conhecimento da realidade onde se pretende agir, o que por vezes implica, dada a inexistência de ferramentas genéricas perfeitamente adequadas, um estudo moroso quando é necessário analisar a variabilidade espacial e temporal das variáveis e fenómenos envolvidos.

Na verdade, a estimação exacta da distribuição espacial de variáveis climatológicas requer uma densa rede de estações, o que acarreta a sua instalação em grande escala e custos operacionais. Além disso, o vandalismo ou as falhas do observador responsável pela recolha dos dados pode resultar em baixas densidades de amostragem, sendo portanto necessário efectuar estimações em localizações não registadas a partir dos valores existentes em locais vizinhos.

Apesar de todas as condicionantes, gradualmente ultrapassadas, conseguiu atingir-se os objectivos iniciais. Foi assim desenvolvida uma aplicação com integração de tecnologias Web e de base de dados, bem como GIS, acessível através da Internet, e que se julga de grande interesse para a Região Demarcada do Dão, especialmente na área da viticultura.

Numa fase inicial efectuou-se a recolha, armazenamento e tratamento da série histórica de dados médios mensais relativos aos elementos climatológicos registados pelas estações que influenciam a região e necessários à aplicação do modelo de análise do balanço hídrico do solo. Em seguida, procedeu-se ao estudo de caracterização e quantificação da distribuição espacial mensal de cada um dos elementos. Nesta fase, os resultados obtidos nem sempre permitiram adoptar a Krigagem como método de estimação geoestatístico. Tornou-se necessário recorrer a métodos determinísticos.

Para a série histórica de dados meteorológicos mensais, o sistema permite mapear a distribuição espacial e temporal de cada um dos elementos climáticos, bem com a quantidade de água que deve ser colocada pela rega para satisfação das necessidades hídricas da cultura da vinha, para os três tipos de solos característicos da região e a três níveis de espessura de solo.

Além disso, com base nos registos horários de duas estações, o sistema permite determinar, *on-line* e em tempo real, a reserva de água no solo ao longo do ciclo vegetativo da cultura da videira, mediante especificação da localização da cultura, bem como a data de início do ciclo vegetativo e, tipo e espessura de solo.

Apesar de se considerarem atingidos os objectivos propostos, relativamente à versão actual do protótipo, têm-se a noção que, haverá muito mais trabalho a desenvolver.

No que respeita à determinação da reserva de água ao longo do ciclo vegetativo da cultura, o sistema deverá permitir guardar os dados introduzidos pelo utilizador relativamente à localização de uma cultura. O desejável seria a integração de informação cartográfica relativa às parcelas de vinha da região. Além disso, o protótipo não considera o facto de o utilizador ter aplicado água no solo pela rega ao longo do ciclo vegetativo da cultura. Neste caso, deverá ser possível ao utilizador indicar as datas em que aplicou água no solo pela rega e com que dotações.

Um outro aspecto a considerar em desenvolvimentos futuros é o da calendarização da rega. Com base na tendência da evolução da reserva de água no solo, o sistema poderá efectuar uma previsão da data em que a cultura entrará em stresse hídrico e propor um calendário de rega com as dotações adequadas de forma a manter a cultura em conforto hídrico.

Por fim, a criação de uma base de dados de solos, bem como a generalização dos serviços a outras culturas, poderão servir de base a um sistema espacial de decisão para todo o sector agrícola da região do Dão.



Bibliografia

- AANGEENBRUG R. T., 1991: A Critique of GIS. In *Geographical Information Systems: Principles and Applications* (D. J. Maguire, M. F. Goodchild e D. W. Rhind, eds.), Vol. 1, 8. Longman Scientific & Technical, London.
- ALLEN, R. G., JENSEN, M. E., WRIGTH, J. L., e BURN, R. D., 1989. Operational estimates of evapotranspiration. *Agron. J.*.
- ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D., SMITH, Martin, 2000. Crop evapotranspiration, Guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage, Paper 56, Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- ANJOMANI, A. e SABERI, A., 1992. Large scale land suitability analysis using GIS and optimization model as a spatial decision support system: a multijurisdiction/multiregion case. *URISA annual conference proceeding*, Washington, DC, Vol. 2.
- ANSELIN, L., 1990. What is special about spatial data? Alternative perspectives on spatial data analysis. In: D. A. Griffith, *Spatial statistics, past, present and future*. Ann Arbor, MI: Institute of Mathematical Geography.
- ANSELIN, L., 1995. *SpaceStat tutorial (with SpaceStat Version 1.80 user's guide)*. Morgantown, WV: Regional Research Institute, West Virginia University.
- ANSELIN, L. e GETIS, A., 1992. Spatial statistical analysis and geographic information systems. *Annals of Regional Science* 26(1).
- ANSELIN, L. e SHUMING, B., 1996. Exploratory spatial data analysis linking SpaceStat and ArcView. Regional Research Institute Working Paper 9618. Morgantown, WV: West Virginia University.
- ANTENNUCCI, J. C., BROWN, K., CROSWELL, P. L., KEVANY, M. J., e ARCHER, H., 1991. *Geographic information systems: a guide to the technology*. New York, Van Nostrand Reinhold.
- ARLINGHAUS, S. L., 1996. *Practical handbook of spatial statistics*. Boca Raton, FL: CRC Press.

- ARONOFF, S., 1989. Geographic information systems: a management perspective. Ottawa, Ontario, Canada, WDL Publications.
- ARTHUR, J. L. e NALLE, D. J., 1997. Clarification on the use of linear programming and GIS for land-use modelling. *International Journal of Geographical Information Science* 11(4).
- BAILEY, T. C., GATRELL, A. C., 1995. Interactive spatial data analysis. 1 ed. Essex, Longman Scientific & Technical.
- BEDIENT, P. B. e HUBER, W. C., 1992. Hydrology and Floodplain Analysis. 2nd ed, Addison-Wesley, Reading, MA.
- BEGUR, S. V., MILLER, D. M. e WEAVER, J. R., 1997. An integrated spatial DDS for scheduling and routing health care nurse. *Interface* 27(4).
- BERRY, J. K., 1986. Learning computer-assisted map analysis. *Journal of Forestry* 56(1).
- BERRY, J. K., 1993. Cartographic modelling: the analytical capabilities of GIS. In: M. Goodchild, B. Parks e L. Steyaert, *Environmental modelling with GIS*. Oxford, Oxford University Press.
- BERRY M. W., R. O. Flamm, B. C. Hazen e R.L. MacIntyre, 1996. The landuse change analysis system (LUCA) for evaluating landscape management decisions. *IEEE Computational Science and Engineering*, 3(1).
- BORGA, M., VIZZACCARO, A., 1997. On the interpolation of hydrologic variables: formal equivalence of multiquadratic surface fitting and kriging. *J. Hydrol.* 195 (1-4), 160-171.
- BRACKEN, I. e WEBSTER, C., 1990. Information technology in geography and planning. London: Routledge.
- BURROUGH, P. A., 1987. Principles of geographical information systems for land resources assessment. Oxford, Clarendon Press.
- BURROUGH, P. A., 1992a. Are GIS data structures too simple minded? *Computers and Geosciences* 18(4).

- BURROUGH, P. A., 1992b. Development of intelligent geographical information systems. *International Journal of Geographical Information Systems* 6(1).
- BURROUGH, P. A. e FRANK, A. U., 1996. *Geographic objects with indeterminate boundaries*. London: Taylor & Francis.
- BURROUGH, P. A. e McDonnell, R. A., 1998. *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press.
- CALIPER CORPORATION, 1996. *TransCAD reference manual: version 3.0*. Newton, MA: Caliper Corporation.
- CAMARGO, E. C. G., FUCKS, S. D., CÂMARA, G., 2000. Análise Espacial de Superfícies por Geoestatística. In *Análise Espacial*. http://www.dpi.inpe.br/cursos/ser_301/cap3/superficies.pdf.
- CAMM, J. D., CHORMAN, T. E., DILL, F. A., EVANS, J. R., SWEENEY e WEGRYN, G. W., 1997. Blending OR/MS, judgment, and GIS: restructuring P & G's supply chain. *Interfaces* 27(1).
- CAMPBELL, J. C., RADKE, J., GLESS, J. T. e WIRTSHAFTER, R. M., 1992. An application of linear programming and geographic information systems: cropland allocation in Antigua. *Environment and Planning A* 24(5).
- CARRIÇO S. R. F. e CARRIÇO S. J. A., 1998. *Desenho de bases de Dados*. CTI, Portugal.
- CASSETTARI, S., 1993. *Introduction to integrated geo-information management*. London, Chapman & Hall.
- CHILÈS, J., D., e DELFINER, P., 1999. *Geostatistics. Modeling Spatial Uncertainty*. Wiley, New York.
- CHOU, Yue-Hong, 1997. *Exploring Spatial Analysis in Geographic Information Systems*. 5ª ed., OnWord Press.
- CHRISTMAN, N. R., 1996. *Exploring geographic information systems*. New York: Wiley.

- CHUVIECO, E., 1993. Integration of linear programming and GIS for land-use modelling. *International Journal of Geographical Information Systems* 7(1).
- COLEMAN, M. B., BEARLY, T. L., BURKE, I. C. e LAUENROTH, W. L., 1994. Linking ecological simulation models to geographic information systems: an automated solution. In: W. K. Michener, J. W. Brunt, and S. G. Stafford. *Environmental information management and analysis: ecosystem to global scales*. London: Taylor & Francis.
- COUCLELIS, H., 1992. People manipulate objects (but cultivate fields): beyond the raster-vector debate in GIS. In: A. U. Frank, I. Campari e U. Formentini, *Theories and methods of spatial-temporal reasoning in geographic space*. Berlin, Springer-Verlag.
- COWEN, D., 1988. GIS versus CAD versus DBMS: What are the differences. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54(2), pp. 1551-1555.
- CRESSIE, N., 1991, *Statistics for spatial data*. 1 ed., New York, Wiley Interscience.
- CRETIUN, J. D. e OBLED, C., 1982. Objective analyses and mapping techniques for rainfall fields: an objective comparison. *Water Resour. Res.* 18 (2), 413-431.
- DANGERMOND, J., 1986. The software toolbox approach to meeting the user's needs for GIS analysis. *Proceedings of the Geographic Information System Workshop*, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Atlanta, GA.
- DAVID, M., 1977. *Geostatistical ore reserve estimation*. New York, Elsevier Scientific.
- DAVIS, F. W. e SIMONETT, D. S., 1991. GIS and Remote Sensing. In *Geographical Information System: Principles and Applications* (D. J. Maguire, M. F. Goodchild e D. W. Rhind, eds), Vol. 1, 14, pp. 197-201. Longman Scientific and Technical.
- DAVIS, B. E., 1996. *GIS: a visual approach*. Santa Fe, NM: On Word Press.
- DAVIS, M., 1997. Uses and Abuses of Cross-Validation in Geoestistics. *Mathematical Geology*, Vol. 19, n.º 3, pp. 249-258.
- DEMERS, Michael N., 1997. *Fundamentals of geographic information systems*. New York, Wiley.

- DEMERS, Michael N., 2000. Fundamentals of Geographic Information Systems. 2ª ed., John Wiley & Sons, Inc.
- DENSHAM, P. J., 1991. Spatial decision support systems. In: D. J. Maguire, M. S. Goodchild e D. W. Rhind. Geographical information systems: principles and applications. Harlow, Essex, England: Longman.
- DENSHAM, P. J. e GOODCHILD, M. F., 1989. Spatial decision support systems: a research agenda. Proceedings of GIS/LIS'89, Orlando, FL.
- DEUTSCH, C., V., JOURNEL, A., G., 1998. GSLIB: Geostatistics Software Library and User's Guide. 2nd ed, Oxford University Press, New York.
- DING, Y, e FOTHERINGHAM, A. S., 1992. The integration of spatial analysis in GIS. Computers, Environment and Urban Systems 16(1).
- DIRKS, K. N., HAY, J. E., STOW, C. D. e HARRIS, D., 1998. High-resolution studies of rainfall on Norfolk Island Part II: interpolation of rainfall data. J. Hydrol. 208 (3-4), 187-193.
- DJOKIC, D. e MAIDMENT, D. R., 1993. Application of GIS network routines for water flow and transport. Journal of Water Resources Planning and Management 119(2).
- DOORENBOS, J. e Pruitt, W. O., 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper n.º 24, FAO, Rome.
- DYKSTRA, D. P., 1984. Mathematical programming for natural resource management. New York: McGraw-Hill.
- EASTMAN, J. R., 1993. IDRISI: a gris based geographic analysis sytem, version 4.1. Worcester, MA: Graduate School of Geography, Clark University.
- EASTMAN, J. R., 1997. IDRISI for Windows, version 2.0: tutorial exercises. Worcester, MA: Graduate School of Geography, Clark University.
- EGENHOFER, M., e FRANK, A. U., 1987. Object oriented databases: database requirements for GIS. Processing of International Geographical Information Systems Symposium: The Resear Agenda 2, pp. 189-211.

- EGENHOFER, M., e HERRING J. R., 1991. High-Level Spatial Data Structures for GIS. In Geographical Information Systems: Principals and Applications (D. J. Maguire, M. F. Goodchild e D. W. Rhind, eds.), Vol. 1, 16. Longman Scientific & Technical, London.
- ELGARF, Tarek M., 1989. Digital Map Accuracy Enhancement. In: URISA Proceeding, Vol II.
- ENGLUND, E. J., 1993. Spatial simulation: environmental applications. In: M. F. Goodchild, L. T. Steyaert, and B. O. Parks. GIS and environmental modelling: progress and research issues. Fort Collins, CO: GIS World, Inc..
- ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE, 1994. Map Projections. Redlands, California: ESRI.
- ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE, 1995. Understanding GIS: the ARC/INFO method. Cambridge: GeoInformation International.
- FISHER, P. F., 1991. Spatial Data Sources and Data Problems. In Geographical Information Systems: Principals and Applications (D. J. Maguire, M. F. Goodchild e D. W. Rhind, eds), Vol. 1, 13, pp. 175-189, Longman Scientific and Technical
- FLOWERDEW, R. e GREEN, M., 1994. Areal interpolation and types of data. In: S. Fotheringham and P. Rogers, Spatial analysis and GIS. London: Taylor & Francis.
- FOOTE, K. E., e LYNCH, M., 1996a. Geographic information systems as an integrating technology: concepts, and definitions. In The geographer's craft project. Austin, TX, Department of Geography, University of Texas at Austin.
<http://www.utexas.edu/depts/grg/gcraft/notes/intro/intro.html>.
- FOTHERINGHAM, S. e ROGERS, P., 1994. Spatial analysis and GIS. London: Taylor & Francis.
- GALLI, A., GERDIL-NEUILLET, F., e DADOU, C., 1984. Factorial Kriging analysis: a substitute to spectral analysis of magnetic data. In: VERLY, G., DAVID, M., JOURNEL, A. G., MARÉCHAL, A. (Eds.). Geostatistics for Natural Resources Characterization. Reidel, Dordrecht.
- GAO, X., SOROOSHIAN, S. e GOODRICH, D. C., 1993. Linkage of a GIS to a distributed rainfall-runoff model. In: M. F. Goodchild, L. T. Steyaert, and B. O. Parks. GIS and

environmental modelling: progress and research issues. Fort Collins, CO: GIS World, Inc.

GOODCHILD, M. F., 1987. A spatial analytical perspective on geographical information systems. *International Journal of Geographical Information Systems* 1(4).

GOODCHILD, M. F., 1991. The Tecnological Setting of GIS. In *Geographical Information Systems: Principles and Applications*. D.J. Maguire, M. F. Goodchild e D. W. Rhind (Eds). Longman Scientific and Technical, UK. Vol I, pp. 45-54.

GOODCHILD, M. F., 1992. Geographical data modelling. *Computers and Geosciences* 18(4).

GOODCHILD, M. F., 1995. Geographic information systems and geographic research. In, J. Pickles, *Ground truth: the social implications of geographic information systems*. New York, Guilford Press.

GOOVAERTS, P., 1997. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford University Press, New York.

GOOVAERTS, P., 1999. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. *Geoderma* 89, 1-46.

GREENBERG, M. R., 1978. *Applied linear programming for the socioeconomic and environmental sciences*. San Diego, CA: Academic Press.

GRIFFITH, D. A. e AMRHEIN, C. G., 1991. *Statistical analysis for geographers*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.

GRIMSHAW, D. J., 1994. *Bringing geographical information systems into business*. Harlow, Essex, England, Longman Scientific and Technical.

HAAN, C. T., 1977. *Statistical Methods in Hidrology*. The Iowa State University Press, Annes.

HASLETT, J., WILLS, G. e UNWIN, A., 1990. SPIDER: an interactive statistical tool for the analysis of spatially distributed data. *International Journal of Geographical Information Systems* 4(3).

- HARTNALL, T. J. e MACALLISTER, B., 1995. Meeting utility needs using object-oriented spatial technology. GIS'95 Conference Proceedings, May, Birmingham, England.
- HEALEY R. G., 1991. Database Management Systems. In Geographical Information Systems: Principals and Applications (D. J. Maguire, M. F. Goodchild e D. W. Rhind, eds.), Vol. 1, 18. Longman Scientific & Technical, London.
- HERZFELD, U. C. e MERRIAM, D. F., 1995. Optimization techniques for integrating spatial data. *Mathematical Geology* 27(5).
- HOHL, Pat, 1998. GIS Data Conversion: Strategies, Techniques, and Management. OnWord Press.
- HOPKINS, L., 1997. Methods for generating land suitability maps: a comparative evaluation. *Journal for American Institute of planners* 34(1).
- HUIJBREGTS, C. J., 1975. Regionalized variables and quantitative analysis of spatial data. In: Davis, J. C.; McCullagh, M. J. ed. *Display and analysis of spatial data*. New York, John Wiley.
- HUXHOLD, William E., 1991. An introduction to urban geographic information systems. New York, NY: Oxford University Press.
- HUXHOLD, William E. e LEVINSOHN, Allan G., 1995. *Geographic Information System Projects*. Oxford University Press, New York.
- ISAAKS, E. H. e SHRIVASTAVA, R. M., 1989, *Introduction to Applied Geostatistics*. New York, Oxford University Press.
- JENSEN, J. R., 1996. *Introductory digital image processing: a remote sensing perspective*. Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall.
- JENSEN, M. E., BURMAN, R. D. e ALLEN, R. G., 1990. *Evapotranspiration and Irrigation Water Requeriments*. American Society of Civil Engineers, New York.
- JOURNEL, A. G. e HUIJBREGTS, C. J., 1978. *Mining Geostatistics*. Academic Press, New York.

- KILLEN, J., 1983. Mathematical programming methods for geographers and planners. London: Croom Helm.
- KLIR, G. J. e YUAN, B., 1995. Fuzzy sets and fuzzy logic: theory and applications. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- LAM, N. S. - N., 1983. Spatial interpolation methods: a review. *American Cartographer* 10(2).
- LANGFORD, M., MAGUIRE, D. J. e UNWIN, D. J., 1991. The areal interpolation problem: estimating population using remote sensing in a GIS framework. In: I. Masser e M. Blakemore. *Handling geographical information: methodology and potential applications*. Harlow, Essex, England: Longman Scientific and Technical.
- LAU, L., 1996. Spatial simulation. Brisbane, Queensland, Australia: Advanced Computational Modelling Center, University of Queensland. URL: <http://www.acmc.uq.edu.au/~ll/thesis/html/sim/Spatial.html>.
- LILLESAND, Thomas M. e KIEFER, Ralph W., 1994. Remote Sensing and Image Interpretation. 3ª ed., John Wiley & Sons, Inc.
- MACDONALD, M. L., 1996. A multi-attribute spatial decision support system for solid waste planning. *Computers, Environment and Urban Systems* 20(1).
- MACMILLAN, W. e PIERCE, T., 1994. Optimization modelling in a GIS frame-work: the problem of political redistricting. In: S. Fotheringham and P. Rogerson. *GIS and spatial analysis*. London: Taylor & Francis.
- MAGUIRE, David J., Worboys, M. F. e Hearnshaw, H. M., 1990. An introduction to object-oriented GIS. *Mapping Awareness* 4(2).
- MAGUIRE, David J., 1991. An Overview and Definition of GIS. In *Geographical Information Systems: Principals and Applications* (D. J. Maguire, M. F. Goodchild e D. W. Rhind, eds.), vol. 1, 1, pp. 9-20. Longman Scientific & Technical, London.
- MAGUIRE, David J. e DANGERMOND, J., 1991. The functionality of GIS. In *Geographical Information Systems: Principals and Applications* (D. J. Maguire, M. F. Goodchild e D. W. Rhind, eds.), vol. 1, 21, pp. 319-335. Longman Scientific & Technical, London.

- MAGUIRE, David J., 1995. Implementing spacial analysis and GIS applications for business and service planning. In, P. Longley e G. Clarke. GIS for business and service planning. Cambridge: GeoInformation International.
- MALCZEWSKI, Jacek, 1999. GIS and Multicriteria Decision Analysis. John Wiley & Inc.
- MARBLE, D. F., CALKINS, H. W., PEUQUER, D. J., 1984. Basic readings in geographic information systems. Williamsville, NY, SPAD Systems Ltd.
- MARTIN, D., 1991. Geographic information systems and their socioeconomic applications. London: Routledge.
- MATHER, P. M., 1991. Computer applications in geography. Chichester, West Sussex, England: Wiley.
- MCCUEN, R. H., 1998. Hydrologic Analysis and Design. 2nd ed, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- MENDES, José, 1995. Apontamentos de Sistemas de Informação Urbanística (Mestrado em Engenharia Urbana). Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- MONMONIER, M. S., 1974. Measures of pattern complexity for choropleth maps. American Cartographer 1(2).
- MURPHY, D. L., 1985. Estimating neighbourhood variability with a binary comparison matrix. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 51(6).
- NETO, Pedro Leão, 1998. Sistemas de Informação Geográfica. 2ª edição, FCA - Editora de Informática.
- OLEA, R. A., 1975. Optimum mapping techniques using regionalized variable theory. Kansas, Kansas Geological Survey. (Series on Spatial Analysis, 2).
- OLIVEIRA, Isaurindo, 2001. O Uso Sustentado da Rega.
<http://www.agroportal.pt/a/2001/ioliveira.htm>

- OPENSHAW, S. e WHITEHEAD, P., 1985. A Monte Carlo simulation approach to solving multicriteria optimisation problems related to planmaking evaluation, and monitoring in local planning. *Environment and Planning B* 12(4).
- OPENSHAW, S., CHARLTON, M. e CARVER, S., 1991. Error propagation: a Monte Carlo simulation. In: I. Masser and M. Blakemore. *Handling geographical information: methodology and potential application*. Harlow, Essex, England: Longman Scientific and Technical.
- PAREDES, Evaristo Atencio, 1994. *Sistema de Informação Geográfica - Princípios e Aplicações (Geoprocessamento)*. Editora Érica, São Paulo.
- PARKER, H. D., 1988. The unique qualities of a geographic information system: a commentary. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 54.
- PAZNER, M., THIES, N., e CHAVEZ, R., 1993. *Simple computer imaging and mapping*. London, Ontario, Canada, Think Space, Inc.
- PEREIRA, H. G., 1981. *Análise estrutural e seus Reflexos na Avaliação Económica de Recursos Minerais*. Tese de Doutorado, IST.
- PEREIRA J. L., 1998. *Tecnologia de Bases de Dados*. FCA.
- PETRIE, G. e KENNIE, T. J. M., 1990. *Terrain modelling in surveying and civil engineering*. London: Whittles Publishing.
- PEUQUET, D. J., 1983. A hybrid structure for the storage and manipulation of very large spatial data sets. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* 24(1).
- PEUQUET, D. J., 1990. A conceptual framework and comparison of spatial data models. In: *Introductory in geographic information systems*. London, Taylor & Francis.
- PHILLIPS, D. L., DOLPH, J., MARKS, D., 1992. A comparison of geostatistical procedures for special analysis of precipitations in mountainous terrain. *Agr. Forest Meteorol.* 58, 119-141.
- RALSTON, B. A., 1994. Object-oriented spatial analysis. In: S. Fortheringham e P. Rogerson, *GIS and spatial analysis*. London: Taylor & Francis.

- RAPER, J. F. e RHIND D. W., 1990. UGIX(A): the design of special language interface for a topological vector GIS. Proceedings of the Fourth International Symposium on Spatial Data Handling, Vol. 1. International Geographical Union, Zurich.
- RAPER, J. F. e BUNDOCK M., 1994: Development of a generic spacial language interface for GIS. In Geographical Information Handling - Research and Applications, Paul M. Mather (Ed.). John Wiley & Sons Ltd., Chichester (Grã-Bertenha).
- RAPER, J. e LIVINGSTONE, D., 1995. Development of a geomorphological spatial model using object-oriented design. International Journal of Geographical Information Systems 9(4).
- RAPER, J. e LIVINGSTONE, D., 1996. High-level coupling of GIS and environmental process modelling. In: M. F. Goodchild, L. T. Steyaert e B. O. Parks, GIS and environmental modelling: progress and research issues. Fort Collins, CO: GIS World.
- R.C.M., Fernando, 1991, Modelação do Balanço Hídrico do Solo. Actas do seminário de Tecnologias de Rega. Departamento de Eng.ª Rural, Instituto Superior de Agronomia, Lisboa.
- RUBINSTEIN, R. Y., 1981. Simulation and the Monte Carlo method. New York: Wiley.
- SILBERSCHATZ, A.; KORTH, H. F. e SUDARSHAN, S.. Sistemas de Bancos de Dados, São Paulo: Makron, 1999.
- SOARES, Amílcar, 2000. Geoestatística para as Ciências da Terra e do Ambiente. IST Press.
- SOUSA, António Jorge e MUGE, Fernando, 1990. Elementos de Geoestatística. Laboratório de Mineralurgia e Planeamento Mineiro.
- STAR, J. e ESTES, J., 1990. Geographic information systems: na introduction. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- STEYAERT, L. T. e GOODCHILD, M. F., 1994. Integrating geographic information systems and environmental simulation models: a status review. In: W. K. Michener, J. W. Brunt e S. G. Stafford, Environmental information management and analysis: ecosystem to global scales. London: Taylor & Francis.

- TABIOS, G. Q. e SALAS, J. D., 1985. A comparative analysis of techniques for spatial Interpolation of precipitation. *Water Resour. Bull.* 21 (3), 365-380.
- TEIXEIRA, José Luis, 1991. ISAREG, Departamento de Eng.^a Rural, Instituto Superior de Agronomia, Lisboa.
- THIESSEN, A. H., 1911. Precipitation averages for large areas. *Monthly Weather Rev.* 39 (7), 1082-1084.
- THOMAS, R. H. e HUGGETT, R. J., 1980. *Modelling in geography: a mathematical approach*. London: Harper & Row.
- TOMLIN, C. D., 1990. *Geographical information systems and cartographic modelling*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- TURBAN, E., 1995. *Decision Support and Expert System. Management Support Systems*. 4^a Edição, Prentice-Hall.
- USDA, 1970. *Irrigation water requirements*. Teach. Release N^o. 21(rev.).
- WACKERNAGEL, H., 1998. *Multivariate Geostatistics*. 2nd ed, Springer, Berlin.
- WATKINS, D. W., JR. e MCKINNEY, D. C., 1995. Recent developments associated with decision support systems in water resources. U. S. National Report to IUGG. *Reviews in Geophysics*, Vol. 33 Suppl. Washington, DC: American Geophysical Union.
- WILSON, A. G., COELHO, J. D., MACGILL, S. M. e WILLIAMS, H. C. W. L., 1981. *Optimization in location and transport analysis*. Chichester, West Sussex, England: Wiley.
- WONG, D. W. S. e MEYER, J. M., 1993. A spatial decision support system approach to evaluate the efficiency of a meals-on-wheels program. *Professional Geographer* 45(3).
- WOODSFORD, P. A., 1995. Object-orientation cartographic generalisation and multi-product databases. *Proceedings of the 17th Conference of the International Cartographic Association*. Barcelona, Spain.

WORBOYS, M. F., 1994. Object-oriented approaches to geo-referenced information. *International Journal of Geographic Information Systems* 8(4).

ZHANG, Z. e GRIFFITH, D. A., 1997. Developing user-friendly spatial statistical analysis modules for GIS: an example using ArcView. *Computers, Environment and Urban Systems* 21(1).



FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

BIBLIOTECA



0000079712