

CARTOGRAFIA DIGITAL DA ÁREA IMPERMEABILIZADA ATRAVÉS DE CLASSIFICAÇÃO IMAGENS LANDSAT 5 TM : UM EXEMPLO DE ANÁLISE ESPACIO-TEMPORAL NO CONCELHO DE ALMADA, PORTUGAL

Maria Teresa SILVA & José António de ALMEIDA

CICEGe, FCT Universidade Nova de Lisboa, Monte da Caparica.
CEP 2829-516. Caparica, Portugal. Endereço eletrônico: ja@fct.unl.pt

Introdução
Metodologia
Análise Espacio-Temporal da Fracção de Área Impermeabilizada no Concelho de Almada
Enquadramento da Área em Estudo
Informação de Partida
Classificação do Uso do Solo Através de Imagens LANDSAT 5 TM
Correlação das Fracções de Área Impermeabilizada Calculadas com a Carta da Área Construída e a Imagem Homóloga de LANDSAT 5TM
Estimativa Local da Fracção de Área Impermeabilizada para 1987
Considerações Finais
Referências Bibliográficas

RESUMO – O presente trabalho tem como objectivo apresentar os resultados de uma metodologia expedita, em Sistemas de Informação Geográfica (SIG), destinada a estimar localmente a fracção de área impermeabilizada para várias datas onde se disponha de imagens temáticas de satélite e para uma das quais se disponha da cartografia da ocupação do solo, completa e à escala de pormenor. Na metodologia proposta faz-se, em primeiro lugar, a correlação das áreas impermeabilizadas obtidas pela cartografia em estrutura vectorial da ocupação do solo e classificação da imagem de satélite homóloga (imagem de referência), numa quadrícula de suportes com várias dimensões múltiplas da resolução espacial da imagem de satélite. Posteriormente, após escolhida a dimensão do suporte que melhor representa o compromisso entre o coeficiente de correlação e a resolução espacial dos resultados, faz-se a regressão linear da fracção de área impermeabilizada para as restantes imagens de datas que podem ser anteriores ou posteriores à imagem de referência. Esta metodologia é ilustrada com um caso de estudo na área do concelho de Almada, Península de Setúbal, Portugal. Os resultados mostram as alterações da ocupação do solo entre 1987 e 2001, com destaque para o acréscimo da fracção de área impermeabilizada em consequência do crescimento urbano.

Palavras-chave: detecção remota; Landsat 5 TM; classificação supervisionada; fracção de área impermeabilizada; análise espacio-temporal.

ABSTRACT – *M.T. Silva & J.A. de Almeida - Digital mapping of surface sealing ratios using landsat 5 TM satellite images: an example of space-time analysis in Almada council, Portugal.* The objective of the present work is to present the results of an expedite methodology, in Geographical Information Systems (GIS), designed to locally estimate the impervious surface ratio for several dates where satellite thematic images and complete and detailed land use cartography are available. Firstly, in the proposed methodology, superficial sealed areas identified by vector land use cartography and the land use obtained by a supervised classification of a homologous thematic image (training image) are correlated making use of a regular grid of square polygons with several sizes multiples of the satellite image resolution. Further on, and after choosing the grid size that better represents the compromise between correlation and spatial resolution, it is performed a linear regression of the superficial sealed ratio for the remaining images posterior or ulterior of the training image. This methodology is illustrated with a case study developed within the area of Almada council, Setúbal Peninsula, Portugal. Results show changes in land use between 1987 and 2001, highlighting the dramatic increase of impervious surface ration due to growing settlements and transport infrastructure.

Keywords: remote sensing; Landsat 5 TM; supervised classification; surface sealing ratio; space-time analysis.

INTRODUÇÃO

Portugal enfrenta actualmente pressão urbanística significativa de partes do seu território, fruto de movimentos populacionais com destino às áreas do litoral (EEA, 2006).

A expansão urbana é normalmente acompanhada de profundas alterações no ambiente natural (Netzband et al., 2007). A impermeabilização da

superfície, resultante da construção de edificações e infra-estruturas associadas, tais como a rede viária e estacionamento, constitui um impacte ambiental negativo significativo, que advém do aumento da área de superfície impermeabilizada, e redução do volume de águas pluviais disponíveis para a recarga de aquíferos.

Em regiões como a Península de Setúbal, imediatamente a Sul de Lisboa, onde o abastecimento de água potável ao público depende quase exclusivamente dos recursos subterrâneos, a diminuição da recarga dos sistemas aquíferos resultante da impermeabilização pode, na ausência de uma estratégia de planeamento adequada, atingir níveis que prejudicam a capacidade destes sistemas em satisfazer, de forma sustentável, as necessidades das populações actuais e futuras. Para além disso, a própria natureza de percolação das águas subterrâneas, que leva a que a água captada num furo se possa ter infiltrado num local longínquo, faz com que a impermeabilização do solo num dado concelho possa ter repercussões negativas sobre a quantidade e qualidade de água disponível às captações pertencentes a outros concelhos vizinhos ou distantes.

Numa lógica de desenvolvimento sustentável, à escala do município, é essencial estabelecer metodologias que permitam monitorizar a evolução de indicadores ambientais como a área impermeabilizada, em termos espaço-temporais. No caso concreto da

avaliação dos eventuais impactes do aumento da área impermeabilizada sobre os recursos hídricos subterrâneos, pode mesmo tornar-se necessário que esta monitorização se estenda para além das fronteiras locais e abranja municípios vizinhos.

A utilização de imagens de detecção remota é prática corrente para a detecção das áreas construídas, mas existem limitações significativas principalmente devido à resolução espacial das imagens, que por exemplo no caso do satélite Landsat 5 TM é de 30 metros. Em determinados locais e períodos do ano, um índice de vegetação do tipo *Normalised Difference Vegetation Index* (NDVI) pode ser um bom indicador da área não impermeabilizada (Braun & Herold, 2004), mas falha em zonas com solos descobertos ou zonas de duna como é o caso da área que se pretende estudar. A utilização de classificadores de máxima verossimilhança, a partir de áreas de treino onde se incluem as principais tipologias de ocupação do solo, nomeadamente a área construída, é a alternativa que conduz a melhores resultados se se pretender utilizar imagens para inferir a área impermeabilizada.

METODOLOGIA

O presente trabalho tem como objectivo apresentar os resultados de uma metodologia destinada a estimar localmente a fracção de área impermeabilizada e a caracterizar a sua evolução temporal.

A fracção de área impermeabilizada de uma região pode ser calculada, de forma directa, para suportes poligonais de qualquer forma e dimensão a partir de uma cobertura vectorial completa das infra-estruturas instaladas. O valor obtido é condicionado pela escala de representação, e pelo grau de completação dos dados, mas pode-se dizer que assumindo que a base de dados está completa, correcta e a uma escala de detalhe, o valor obtido desta área é o mais realista que pode ser obtido (área impermeabilizada efectiva – AI_{ef}).

Quando esta informação não está disponível, ou não tem a qualidade suficiente, a alternativa para calcular a área impermeabilizada é a classificação de imagens de satélite multi-espectrais, nomeadamente de *Landsat 5 thematic mapper* (TM) (Jensen, 1996). Neste tipo de imagens, a resolução espacial é de 30 x 30 metros para as bandas 1-5 e 7. Neste caso, obtém-se uma estimativa indirecta da área impermeabilizada (AI_{TM}^*).

A classificação digital de imagem usa a informação espectral representada pelos níveis digitais de uma ou mais bandas espectrais, para afectar a cada célula a classe temática de ocupação dominante. O objectivo é fazer corresponder a todas as células da imagem uma

única classe particular ou tema. A imagem resultante é constituída por um novo mosaico de células, ou seja, um mapa temático da imagem original (Lillesand & Kiefer, 1994; Sabins, 1997; Tso & Mather, 2001; Carvalho, 2002).

Nas várias classes que podem ser obtidas, tem aqui particular interesse a classe de ocupação que corresponde a uma complexa mistura de diferentes materiais como asfalto, betão, metal, plástico e argila (telha). Estes materiais são discriminados pela resposta espectral das bandas das imagens de satélite, podendo todavia a classificação ser dificultada pela presença de sombras.

Para a realização deste trabalho foi utilizada a classificação supervisionada. Neste tipo de classificação são identificadas, *a priori*, zonas representativas dos diferentes tipos de ocupação da superfície ou classes temáticas. Estas zonas são muitas vezes designadas por áreas de treino, no sentido em que representam as características espectrais de cada classe de ocupação que se pretende identificar na imagem.

Para atribuir a classe de ocupação dominante a cada célula utilizam-se classificadores ou algoritmos de afectação. Dentre todos os classificadores candidatos, optou-se pelo de máxima verossimilhança, uma vez que para situações análogas às que são encontradas neste estudo conduz, normalmente, aos melhores resultados. A partir dos parâmetros estatísticos de cada classe, este classificador ajusta, *a priori*, uma lei de

distribuição do tipo gaussiano para cada classe de ocupação, segundo as várias bandas. Cada célula da imagem é caracterizada, *a posteriori*, por um vector de probabilidades de pertença a cada uma das classes de ocupação definidas. Na fase final do algoritmo é apresentada a classe de maior probabilidade e o vector de probabilidades, *a posteriori*, de pertença a cada classe de ocupação.

No presente trabalho, e para a área do concelho de Almada, dispõe-se de cartografia digital vectorial completa das infra-estruturas à escala 1/1.000 (todos os objectos com dimensão igual ou superior a 1 m, o que corresponde a 1 mm da representação) para o ano 2001. Esta representação permite calcular localmente a área impermeabilizada efectiva em 2001.

Para se obter a evolução temporal desta área seria necessário dispor de cartografia vectorial da ocupação para as datas em que se pretende aferir estas áreas, o que não é o caso na área em estudo. Tendo em vista este objectivo, propõe-se seguidamente uma metodologia expedita baseada na classificação de imagens de satélite de várias datas mas para uma as quais exista a correspondente cartografia vectorial das infra-estruturas.

A partir destas duas fontes de informação, cartografia vectorial da área construída a uma escala de detalhe e várias imagens multi-espectrais de satélite onde uma é contemporânea da cartografia vectorial, a metodologia proposta pode ser resumida nas seguintes etapas (Figura 1):

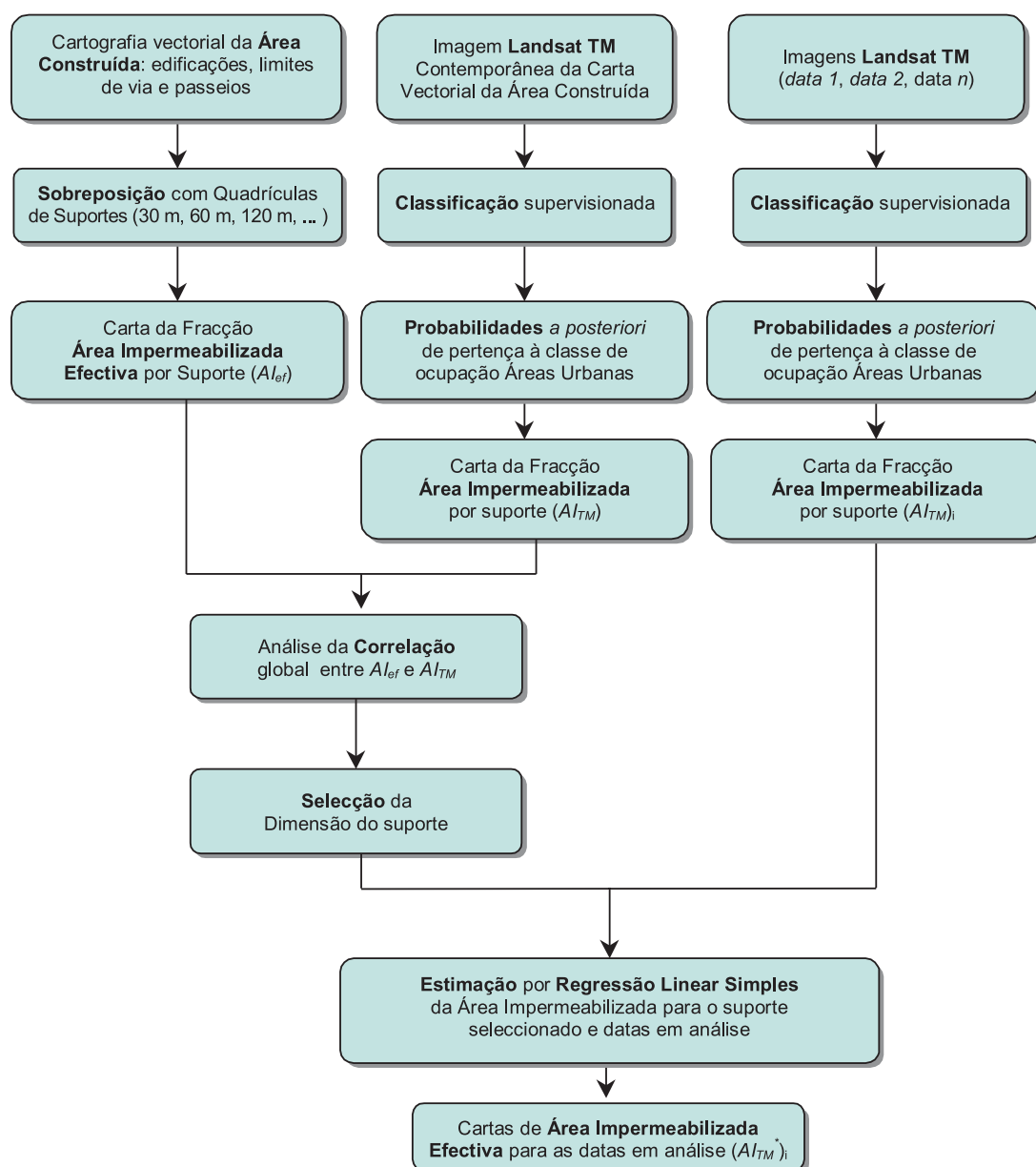


FIGURA 1. Fluxograma da metodologia utilizada na estimação da área impermeabilizada efectiva para várias datas.

1. Construção de um tema com estrutura vectorial de polígonos em SIG (Burrough & McDonnell, 1997; Matos, 2001), que resulta da união de todos os limites das áreas construídas / impermeabilizadas (edificações, limites de via e passeios) na área seleccionada à data da última actualização da cartografia.
2. Sobreposição do tema referido no ponto anterior com Quadrículas de Suportes de várias dimensões múltiplas da imagem de satélite (30 m, 60 m, 120 m, ...). Cálculo da área impermeabilizada efectiva (AI_{ep}) em cada suporte x_p , ou da respectiva fracção. Assumindo que a cartografia vectorial é actualizada e completa, este estimador da área impermeabilizada tem baixa incerteza.
3. Classificação supervisionada, com o classificador de máxima verossimilhança (Lillesand & Kiefer, 1994; Carvalho, 2002), de todas as imagens de satélite Landsat TM disponíveis e referentes às datas em análise, uma das quais é contemporânea da cartografia de área construída referida no ponto 1. As imagens necessitam de estar georeferenciadas e cortadas para a mesma área em análise e as classes de ocupação têm de incluir um descritor de áreas urbanas.
4. Retenção dos mapas de probabilidade, *a posteriori*, de pertença à classe de ocupação áreas urbanas. De acordo com o formalismo teórico do classificador de máxima verossimilhança, estas probabilidades podem ser assumidas, localmente, como o grau de pertença da célula em análise à classe de ocupação do solo que é, entre outros factores, função da fracção de área que representa a respectiva classe de ocupação.
5. Sobreposição do mapa de probabilidades, *a posteriori*, de pertença à classe de ocupação das áreas urbanas com as quadrículas já consideradas no ponto 2). Para cada quadrícula, estimação da área impermeabilizada de cada célula (AI_{TM}^*). Este é um estimador indirecto da área impermeabilizada e revela maior incerteza do que o indicador calculado em 2).
6. Análise da correlação entre os dois indicadores independentes, obtidos em 2) e 5), da área impermeabilizada através dos diagramas de dispersão e coeficientes de correlação para cada quadrícula para a data onde existem simultaneamente dados de cartografia vectorial e de imagem de satélite.
7. Selecção da quadrícula de menor dimensão onde se considera existir boa correlação local entre os indicadores obtidos.
8. Estimação da área impermeabilizada para as restantes datas em análise por Regressão Linear.
9. Análise sumária da evolução da região nos anos em causa. Foram utilizados os *softwares* de processamento de imagens ERMapper 7.0 (classificação e contabilização de percentagens de ocupação do solo) e o Sistema de Informação Geográfica ArcGis 9.2 (processamento temas vectoriais, saídas gráficas).

ANÁLISE ESPACIO-TEMPORAL DA FRACÇÃO DE ÁREA IMPERMEABILIZADA NO CONCELHO DE ALMADA

ENQUADRAMENTO DA ÁREA EM ESTUDO

O concelho de Almada faz parte da Bacia do Baixo Tejo, que é uma unidade morfoestrutural de idade cenozóica (Ribeiro et al., 1979). Esta bacia encontra-se limitada a Norte pela Serra de Sintra e a Sul pela Serra da Arrábida, compartimentos de idade mesozóica.

Em termos estratigráficos distinguem-se duas unidades, o Miocénico e o Quaternário (aluvões, dunas e areias de duna). As formações miocénicas foram escavadas e cobertas por aluviões quaternários (Zbyszewsky, 1963; Lamas, 1998; Silva, 2003).

Em termos hidrogeológicos, a área do concelho de Almada enquadra-se na grande Bacia Hidrográfica do Rio Tejo num sistema aquífero multi-camada (Quintela, 1996). O escoamento superficial é efémero em praticamente todos os vales, uma vez que a sua extensão é bastante reduzida.

INFORMAÇÃO DE PARTIDA

Para proceder à análise espacio-temporal da área impermeabilizada na área do concelho de Almada foram utilizadas duas imagens de satélite Landsat 5 TM, adquiridas pelo sensor Landsat 5 Thematic Mapper (TM), no Verão de 1987 e 2001, integrando 6 bandas do visível ao infra-vermelho médio e sem contaminação por nuvens, e os temas SIG em estrutura vectorial “edificações”, “estradas” e “passeios” disponíveis à data da última actualização da cartografia do Concelho de Almada, igualmente 2001.

O pré-processamento das imagens de satélite incluiu a sua correcção geométrica e radiométrica. Assim, as duas imagens foram convertidas radiometricamente para a reflectância ao nível do sensor, através de um método de correcção baseado nas imagens (Markham & Barker, 1987), e georreferenciadas

relativamente às cartas topográficas, à escala 1:25 000 do Instituto Geográfico do Exército (IgeoE), produzidas segundo o sistema de projecção Hayford-Gauss (transversa de Mercator – *datum* Lisboa). A Figura 2 mostra uma composição colorida RGB das bandas 3, 2 e 1 das duas imagens referidas após o respectivo pré-processamento.

Na primeira etapa do estudo fez-se a construção de um tema com estrutura vectorial de polígonos que resulta da união dos limites de todas as construções registadas na Base de Dados digital da Câmara de Almada, nomeadamente, edificações, limites de via e passeios (Figura 3). Este tema constitui a área impermeabilizada efectiva (AI_{ef}). Na área do concelho existem 7 pequenas bacias hidrográficas que se encontram representadas na mesma figura como informação estruturante.

CLASSIFICAÇÃO DO USO DO SOLO ATRAVÉS DE IMAGENS LANDSAT 5 TM

A classificação do uso do solo foi realizada com as bandas TM 1, 2, 3, 4, 5 e 7; a utilização da banda 6

foi declinada em virtude da sua definição espacial grosseira. Foram consideradas oito classes de ocupação do solo: 1) água superficial; 2) água profunda; 3) edificações/estradas; 4) vegetação rasteira; 5) mata; 6) solo; 7) sapal e 8) areia. Os resultados da classificação das duas imagens, respectivamente de 1987 e 2001, encontram-se representados na Figura 4.

Para descrever a evolução da área estudada entre 1987 e 2001, circunscrita ao limite do concelho de Almada, foi construída a matriz de contingência (Quadro 1), com as áreas totais, em percentagem, ocupadas pela água (soma das classes água superficial e água profunda), área urbana (edificações e estradas), vegetação (vegetação rasteira), mata, solo, sapal e areia. O quadro mostra, também, qual a repartição de fracções de uma determinada classe de ocupação que mudaram para outra classe de ocupação do solo. Os valores na diagonal representam as fracções que não sofreram alteração. A soma por linhas ou por colunas (proporções marginais) representam a fracção de cada ocupação no ano respectivo; a soma das proporções marginais é 100%.



FIGURA 2. Composição RGB das bandas 3, 2 e 1 das imagens Landsat 5 TM de 1987 e 2001 da área do concelho de Almada.

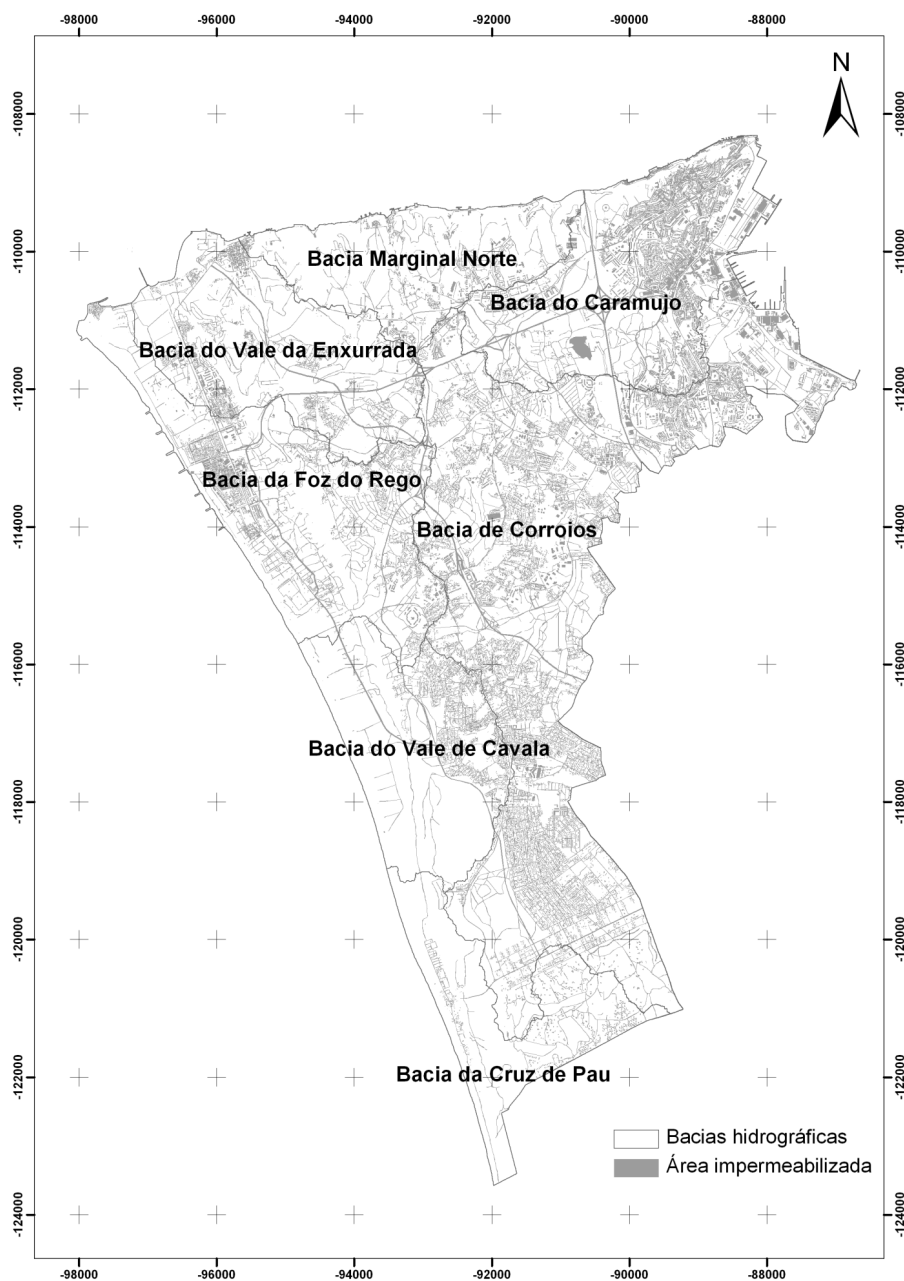


FIGURA 3. Cartografia da área construída em 2001 e bacias hidrográficas identificadas no concelho de Almada.

A classe de ocupação que evidenciou maior expansão foi a área urbana, que passou de 19,11% da área total do concelho em 1987, para 37,59% em 2001; conquistou zonas que anteriormente pertenciam, principalmente, à vegetação rasteira, 10,60%, e aos solos, 11,38%.

A vegetação rasteira foi a classe de ocupação que mais diminuiu em área, passando de 41,82%, em 1987, para 25,16% em 2001. Esta diminuição deve-se, como já foi dito, à custa da expansão da área urbana. Além disso, 2,57% da área passou a pertencer à classe de ocupação matas, provavelmente, porque em 1987 estas áreas corresponderiam a árvores de pequeno porte e foram classificadas como vegetação rasteira.

Também 9,73% da área passou a pertencer aos solos, possivelmente, porque a imagem de satélite de 1987 diz respeito a uma altura em que os terrenos se encontravam semeados e a imagem de satélite mais actual corresponde a uma época pós-colheitas.

A área ocupada pelas matas aumentou ligeiramente de 7,69% para 8,48%. Este crescimento deve-se a 2,57% de área ocupada anteriormente pela vegetação rasteira e a 1,34% dos solos. As perdas de área são pequenas, uma vez que a maior parte das matas existentes no Concelho de Almada fazem parte da Reserva Ecológica Nacional (REN), logo encontram-se protegidas por legislação adequada.

Apesar dos solos terem perdido 11,38% da área

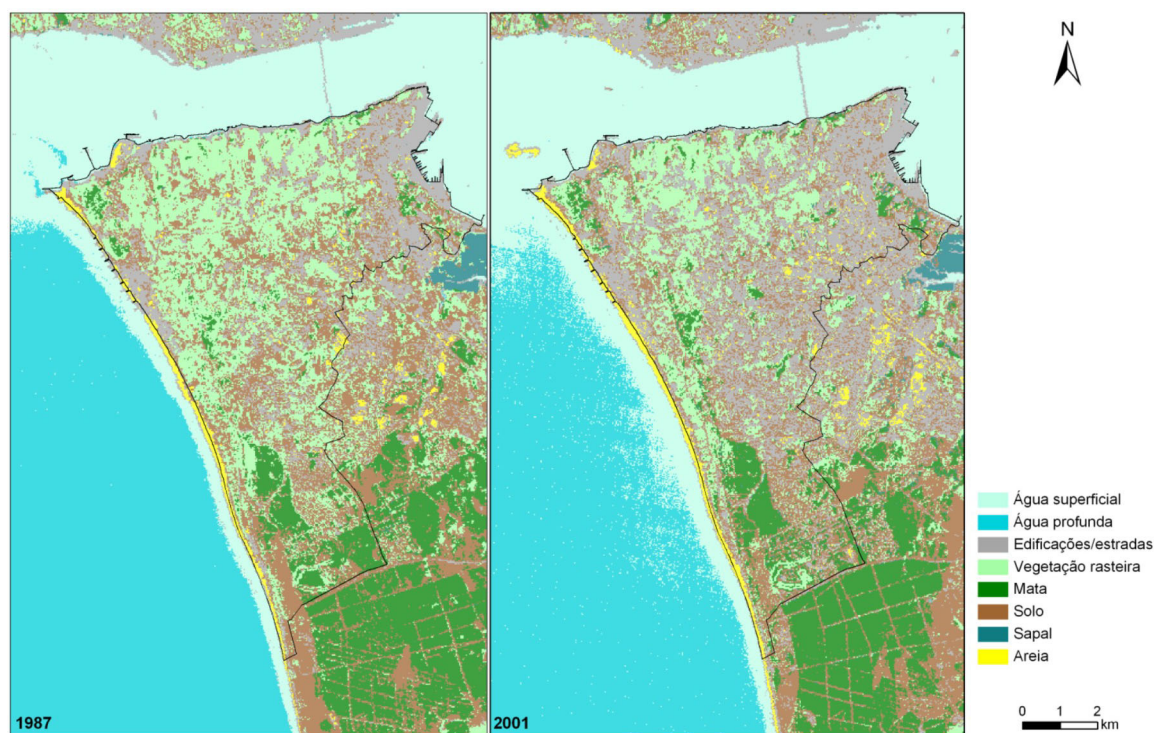


FIGURA 4. Classes de ocupação do solo obtidas por classificação das imagens Landsat 5 TM relativas a 1987 e 2001.

QUADRO 1. Matriz de contingência das classes de ocupação do solo no concelho de Almada relativas a 1987 e 2001 (valores em % da área total).

		2001							
		Água	Urbano	Vegetação	Matas	Solos	Sapal	Areia	
1987	Água	0,35	0,16	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,53
	Urbano	0,20	14,35	0,98	0,10	2,96	0,04	0,48	19,11
	Vegetação	0,00	10,60	18,46	2,57	9,73	0,21	0,26	41,82
	Matas	0,00	0,48	0,75	4,45	1,89	0,09	0,03	7,69
	Solos	0,01	11,38	4,91	1,34	10,72	0,16	0,34	28,87
	Sapal	0,00	0,03	0,01	0,02	0,02	0,00	0,00	0,08
	Areia	0,00	0,59	0,04	0,00	0,13	0,00	1,04	1,81
		0,57	37,59	25,16	8,48	25,47	0,50	2,15	100

total do concelho para áreas urbanas, o seu valor total nos anos em questão pouco variou (de 28,87 para 25,47%), uma vez que 9,73% da área total do concelho ocupada em 1987 por vegetação rasteira, 2,96% por área urbana e 1,89% por matas, passou a ser ocupada por solo.

Verifica-se que a imagem mais recente foi obtida durante a maré-cheia e a de 1987 durante a maré-baixa. Este facto pode explicar o aumento de área da ocupação sapal, desde 1987, que é feito à custa de 0,21% e 0,16% de área ocupada anteriormente por vegetação rasteira e solos, respectivamente. Em altura de maré baixa, a água do sapal recua e as plantas e lodo aí existentes ficam a descoberto, passando a ser

classificados, pelo algoritmo, como vegetação rasteira e solos em vez de sapal.

Por fim, as areias também sofreram um pequeno aumento da sua área, por contribuição de 0,48%, 0,26% e 0,34% de área anteriormente ocupada por área urbana, vegetação rasteira e solo, respectivamente. Observa-se também a alteração dos bancos de areia no Rio Tejo, que ora são visíveis (2001) ora desaparecem (1987). A classificação confunde, um pouco, as áreas urbanas e as areias, logo, a comparação de áreas feita globalmente, relativas a estas classes de ocupação não é sustentada. No Quadro 2 apresenta-se a análise comparativa das classes de ocupação agregados por bacia hidrográfica.

QUADRO 2. Percentagem de área relativa a cada classe de ocupação por bacia hidrográfica em 1987 e 2001.

Ocupação e ano		Bacia hidrográfica						
		Cruz de Pau	Marginal Norte	Vale de Cavala	Vale da Enxurrada	Caramujo	Foz do Rego	Corroios
Água	1987	0,24	2,81	0,00	0,75	0,39	0,52	0,33
	2001	0,03	2,75	0,00	0,86	0,65	0,26	0,51
Urbano	1987	7,36	14,41	10,09	13,48	41,79	19,21	19,78
	2001	11,36	28,61	22,18	29,40	57,89	34,09	40,06
Vegetação	1987	19,62	66,18	40,68	56,71	33,97	48,41	32,59
	2001	17,12	48,81	30,41	41,21	18,60	28,70	15,29
Mata	1987	22,09	2,19	13,25	3,25	1,41	4,91	10,52
	2001	21,54	3,50	17,05	4,64	1,39	5,83	10,09
Solo	1987	44,50	13,66	32,75	24,27	21,40	23,59	35,44
	2001	41,49	15,44	27,10	21,67	19,21	25,21	31,17
Sapal	1987	0,12	0,29	0,03	0,09	0,24	0,03	0,09
	2001	0,89	0,53	0,62	0,63	0,48	0,45	0,95
Areia	1987	6,08	0,46	3,21	1,45	0,80	3,33	1,24
	2001	7,58	0,35	2,63	1,59	1,78	5,45	1,92

Em síntese, a bacia hidrográfica com maior percentagem de áreas urbanas é a Bacia do Caramujo, tanto em 1987 (41,79%) como em 2001 (57,89%). Por outro lado, a bacia com menos áreas urbanas é a bacia da Cruz de Pau, tanto em 1987 (7,36%) como em 2001 (11,36%). As restantes bacias, por ordem decrescente de percentagem de área de ocupação urbana, são: Bacia de Corroios, 19,78%, em 1987, e 40,06%, em 2001; Bacia da Foz do Rego, 19,21%, em 1987, e 34,09%, em 2001; Bacia do Vale de Cavala, 10,09%, em 1987, e 22,18%, em 2001. Em 1987 a Bacia Marginal Norte apresentava maior percentagem de área ocupada por zonas urbanas, do que a Bacia do Vale da Enxurrada, 14,41% e 13,48%, respectivamente. No entanto, em 2001, a percentagem de área da ocupação urbana na Bacia do Vale da Enxurrada é superior à da Bacia Marginal Norte, 29,40% e 28,61%, respectivamente.

Para a análise que se segue, foram seleccionados os mapas de probabilidade, *a posteriori*, de pertença à classe de ocupação área urbana, resultantes do classificador de máxima verossimilhança para duas datas consideradas. Como já foi referido, estes mapas representam, localmente, a probabilidade de cada célula pertencer à classe de ocupação áreas urbanas e constituem indicador indirecto da área impermeabilizada. Na Figura 5 mostram-se os dois mapas de probabilidade relativos a 1987 e 2001.

CORRELAÇÃO DAS FRACÇÕES DE ÁREA IMPERMEABILIZADA CALCULADAS COM A CARTA DA ÁREA CONSTRUÍDA E A IMAGEM HOMÓLOGA DE LANDSAT 5 TM

Nesta etapa da metodologia proposta, pretende-se avaliar a correlação entre o tema SIG em estrutura vectorial da área construída (Figura 3) e a imagem homóloga (contemporânea) de Landsat 5 TM representada pela matriz de probabilidade, *a posteriori*, de pertença à classe de ocupação de áreas urbanas (Figura 5 à direita).

A correlação foi analisada para uma quadrícula de suportes de igual dimensão que ocupa toda a área de estudo. Para escolher a dimensão mais adequada para a análise e apresentação dos resultados foram testadas várias dimensões (30, 60, 120, 150, 300, 450, 600, 750, 900, 1200, 1500 e 3000 metros), múltiplas da dimensão unitária das células da imagem de satélite (30 metros).

Na Figura 6 ilustra-se o procedimento experimental utilizado para uma malha de suportes com 750 x 750 metros cada. Na imagem da esquerda encontram-se representadas a cinzento as infraestruturas, cuja área total constitui a área impermeabilizada efectiva no suporte x_i , $AI_{ef}(x_i)$. Na imagem da direita representam-se as probabilidades *a posteriori* de pertença à classe áreas urbanas, que permitem estimar

a área impermeabilizada $AI_{TM}^*(x_i)$ na mesma localização x_i .

O estimador de área impermeabilizada obtido a partir das imagens $AI_{TM}^*(x_i)$ é calculado pela média dos valores de probabilidade *a posteriori* das células da imagem de Landsat 5 TM que estão contidas dentro do suporte de localização x_i multiplicada pela área do suporte. No exemplo da Figura 6, com suportes de 750 x 750 metros, a média refere-se a 725 valores cada um representativo de uma área de 30 x 30 metros.

Os resultados obtidos consistem num par de temas homólogos onde estão reportados os dois estimadores, independentes, da área impermeabilizada, respecti-

vamente, quando obtidos a partir da cartografia vectorial $AI_{ef}(x_i)$ e a partir da imagem de satélite $AI_{TM}^*(x_i)$.

Seguidamente fez-se a análise da correlação entre estes dois estimadores de área impermeabilizada, cujos resultados estão sintetizados no Quadro 3. Nesta análise excluíram-se todos os suportes localizados nos limites do concelho que não preenchessem, pelo menos, 25% em área.

Na Figura 7 mostram-se diagramas de dispersão e respectivas rectas de regressão entre os dois estimadores da área impermeabilizada, $AI_R(x_i)$ e $AI_{TM}^*(x_i)$, para quatro dimensões de suportes.

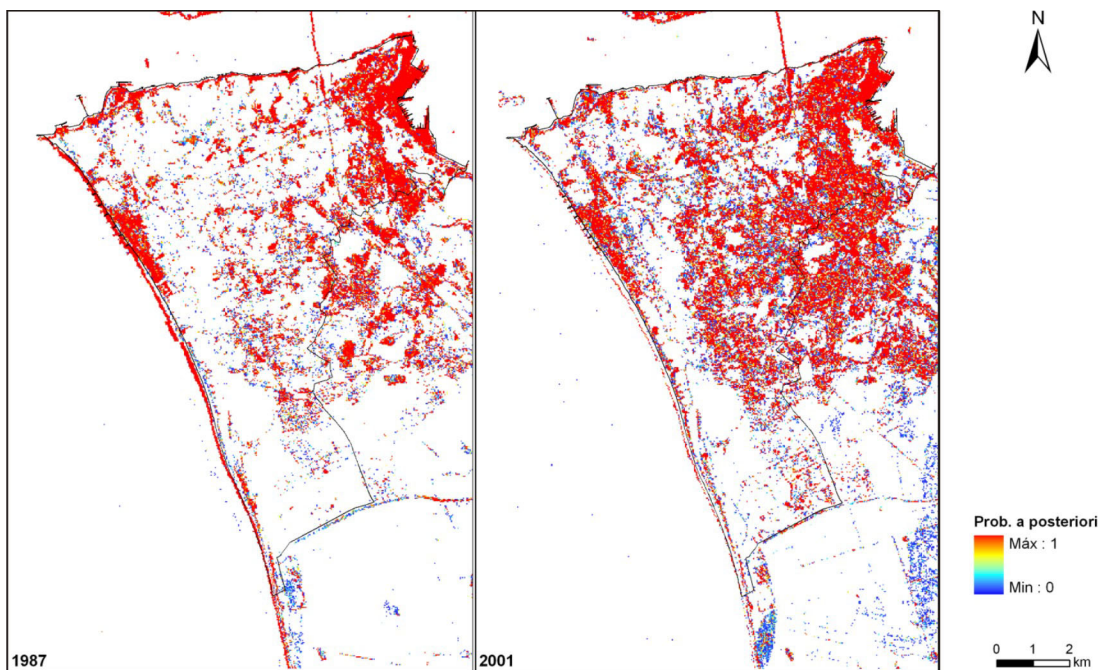


FIGURA 5. Probabilidade de pertença à classe de ocupação área urbana obtidas por classificação da imagem de satélite Landsat 5 TM para 1987 e 2001.

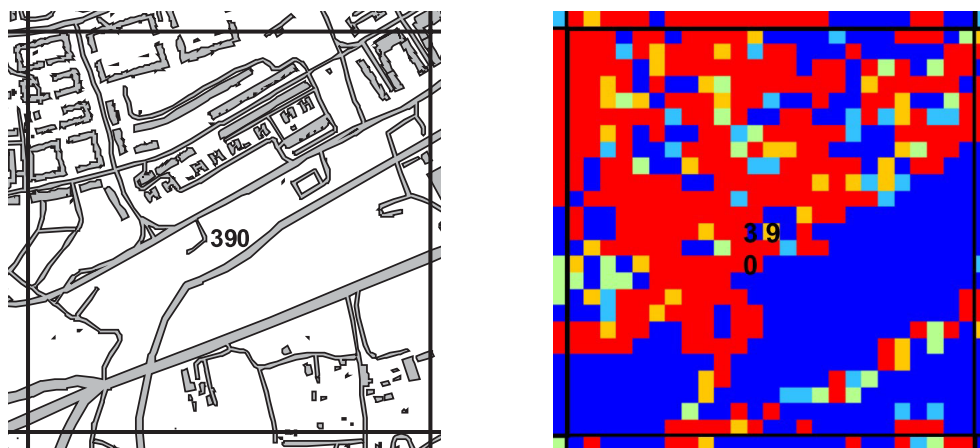


FIGURA 6. Estimação da área impermeabilizada num suporte: esquerda) a partir do tema vectorial área construída; b) a partir da matriz de probabilidades *a posteriori* de pertença à classe de ocupação áreas urbanas.

QUADRO 3. Análise da correlação entre os dois estimadores de área impermeabilizada.

Dimensão do suporte (m)	Área unitária (ha)	Nº total de suportes	Coefficiente de correlação de Pearson
30 x 30	0,09	79487	0,23
60 x 60	0,36	19508	0,34
120 x 120	1,44	4874	0,47
150 x 150	2,25	3118	0,52
300 x 300	9	782	0,63
450 x 450	20,25	342	0,70
600 x 600	36	196	0,73
750 x 750	56,25	123	0,75
900 x 900	81	87	0,77
1200 x 1200	144	49	0,78
1500 x 1500	225	30	0,82
3000 x 3000	900	17	0,92

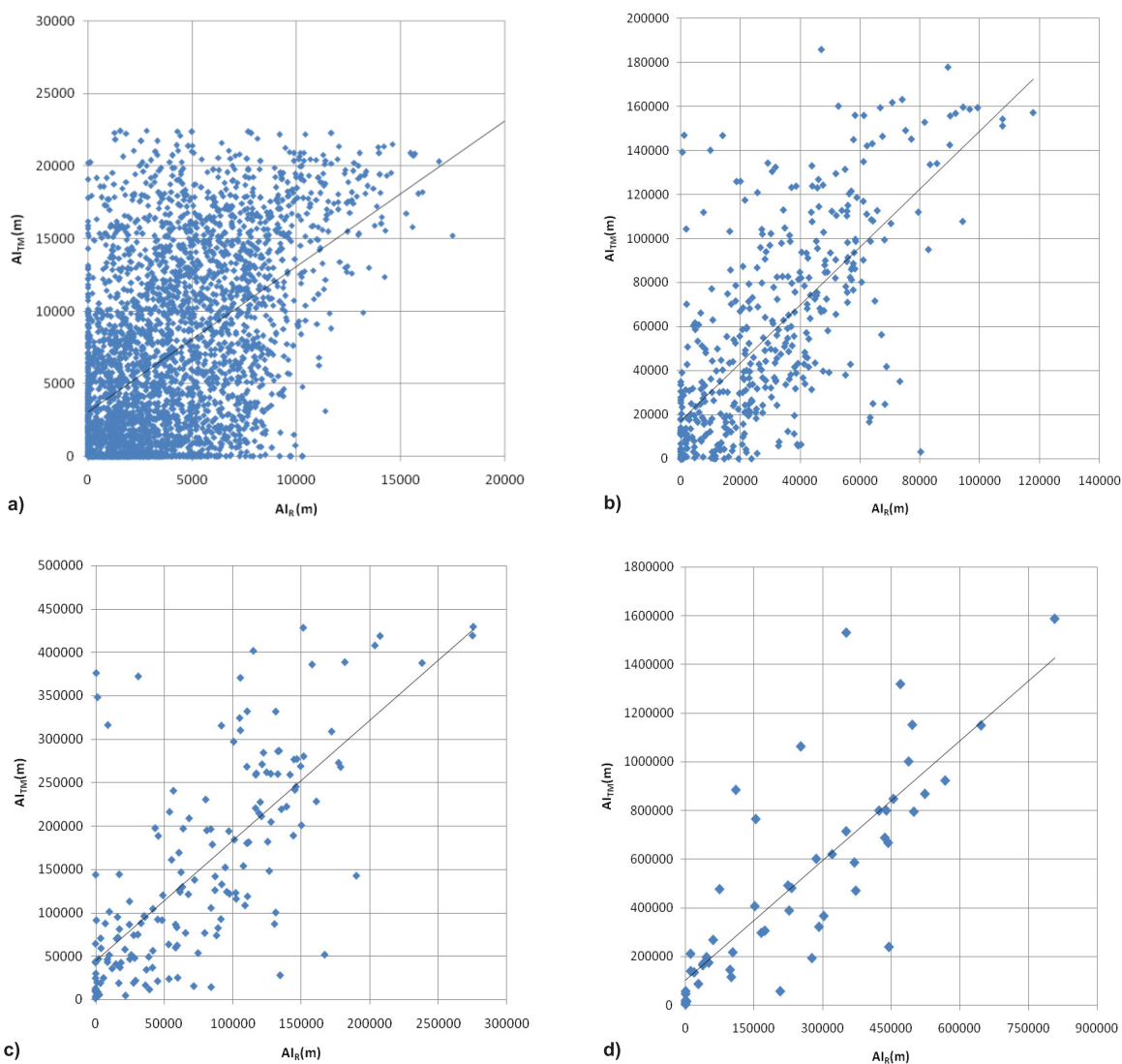


FIGURA 7. Diagramas de dispersão e respectivas rectas de regressão entre os dois estimadores da área impermeabilizada, $AI_R(x_i)$ e $AI_{TM}^*(x_i)$, para suportes com: a) 150 metros; b) 450 metros; c) 750 metros; d) 1500 metros.

Quanto maior é a dimensão do suporte mais elevada é a correlação entre as duas estimativas da área impermeabilizada. Por exemplo, para a quadrícula de maior dimensão (3000 metros de lado, 900 ha em área) o coeficiente de correlação global entre as áreas de infiltração é de 0,92; pelo contrário, quando a dimensão do suporte coincide com a da imagem Landsat 5 TM (30 metros de resolução espacial), o coeficiente de correlação é de apenas 0,23.

A degradação da correlação é explicada pela acumulação de várias situações de erro, que para suportes de menor dimensão não são atenuadas pelo operador contextual ou filtro de janela móvel em que se baseia o processo utilizado. Essas situações de erro são provenientes, essencialmente, do estimador baseado na imagem de satélite, nomeadamente, na georeferenciação da imagem e na ocorrência de células mistas.

Também constata-se que a relação de grandeza entre as duas áreas varia entre uma vez e meia a duas vezes (é maior para suportes maiores), indicando que existe sobreestimação sistemática do indicador das áreas impermeabilizadas através da imagem de satélite. Também aqui o enviesamento sistemático nos estimadores é o resultado do balanço entre a fracção de áreas verdadeiramente construídas dentro das grandes manchas urbanas e a incapacidade das células com 30 metros de lado poderem capturar todos os detalhes da área efectivamente construída.

Para a apresentação dos resultados finais optou-se por utilizar a quadrícula com suportes de 750 metros (correlação de 0,75) onde cada célula representa 56,25 ha, tendo-se obtido a recta de regressão linear:

$$AI_{TM}^* = 0,37 AI_{TM} + 18843,90$$

Para validar, de forma muito simples, a aplicabilidade desta regressão linear, recalcularam-se os valores do indicador da área impermeabilizada para 2001, ano onde são conhecidos os dois estimadores, e calcularam-se os erros na estimação de cada suporte x_i do seguinte modo:

$$\text{Erro estimação } (x_i) = 100 \frac{AI_{TM}^*(x_i) - AI_{sf}(x_i)}{\text{Área do suporte}} \%$$

Os resultados obtidos referem-se a 2001 e encontram-se representados na Figura 8 em termos da fracção de área impermeabilizada. Na Figura 8a, apresentam-se os resultados obtidos a partir da cartografia vectorial; na Figura 8b, os resultados homólogos obtidos a partir da imagem de satélite Landsat 5 TM; na Figura 8c, os resultados obtidos por regressão linear e que podem ser comparados directamente com a Figura 8a; na Figura 8d apresentam-se os erros na estimação, em percentagem da área total de cada suporte.

O histograma da Figura 9 resume a percentagem em área do concelho onde se consideram as estimativas por classes de erros de estimação. O gráfico mostra que em cerca de 52,5% da área do Concelho de Almada os erros de estimação da área impermeabilizada são inferiores a 5% em módulo e que em cerca de 82% é inferior a 10%, também em módulo.

ESTIMATIVA LOCAL DA FRACÇÃO DE ÁREA IMPERMEABILIZADA PARA 1987

Com base na lei de regressão linear ajustada para a imagem de referência de 2001, foi estimada a fracção de área impermeabilizada para 1987, cujos resultados estão representados, em percentagem de área, na Figura 10a. Na Figura 10b representa-se o crescimento da área impermeabilizada entre 1987, e 2001 também em percentagem.

Da análise da Figura 10, verifica-se que as áreas onde existe maior taxa de crescimento da área impermeabilizada estão contidas nas bacias hidrográficas de Corroios e Caramujo. Em particular, a bacia de Corroios, pela sua maior taxa de expansão das áreas urbanas sobre uma grande superfície e pelo facto de constituir uma bacia hidrográfica importante do ponto de vista das recargas hidráulicas constitui uma área merecedora de especial atenção relativamente ao desenvolvimento e planeamento urbano.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A classificação de imagens de satélite proporcionou uma forma eficaz de avaliar, a uma escala grosseira (resolução de 30 metros), a ocupação de solo “dominante” na área em estudo. Desta análise, a principal conclusão é que a variação da ocupação urbana ao longo dos anos em estudo, é positiva em todas as bacias, ou seja, houve um aumento significativo e global da área construída.

Seguidamente, no âmbito da metodologia proposta foi quantificada a fracção da área impermeabilizada, agregada por quadrícula, para 2001. Esta fracção foi estimada com base na cartografia digital do Concelho de Almada em estrutura vectorial de polígonos e em duas imagens do satélite Landsat 5 TM. Verificou-se que os resultados obtidos por estes dois processos independentes são correlacionáveis, desde que

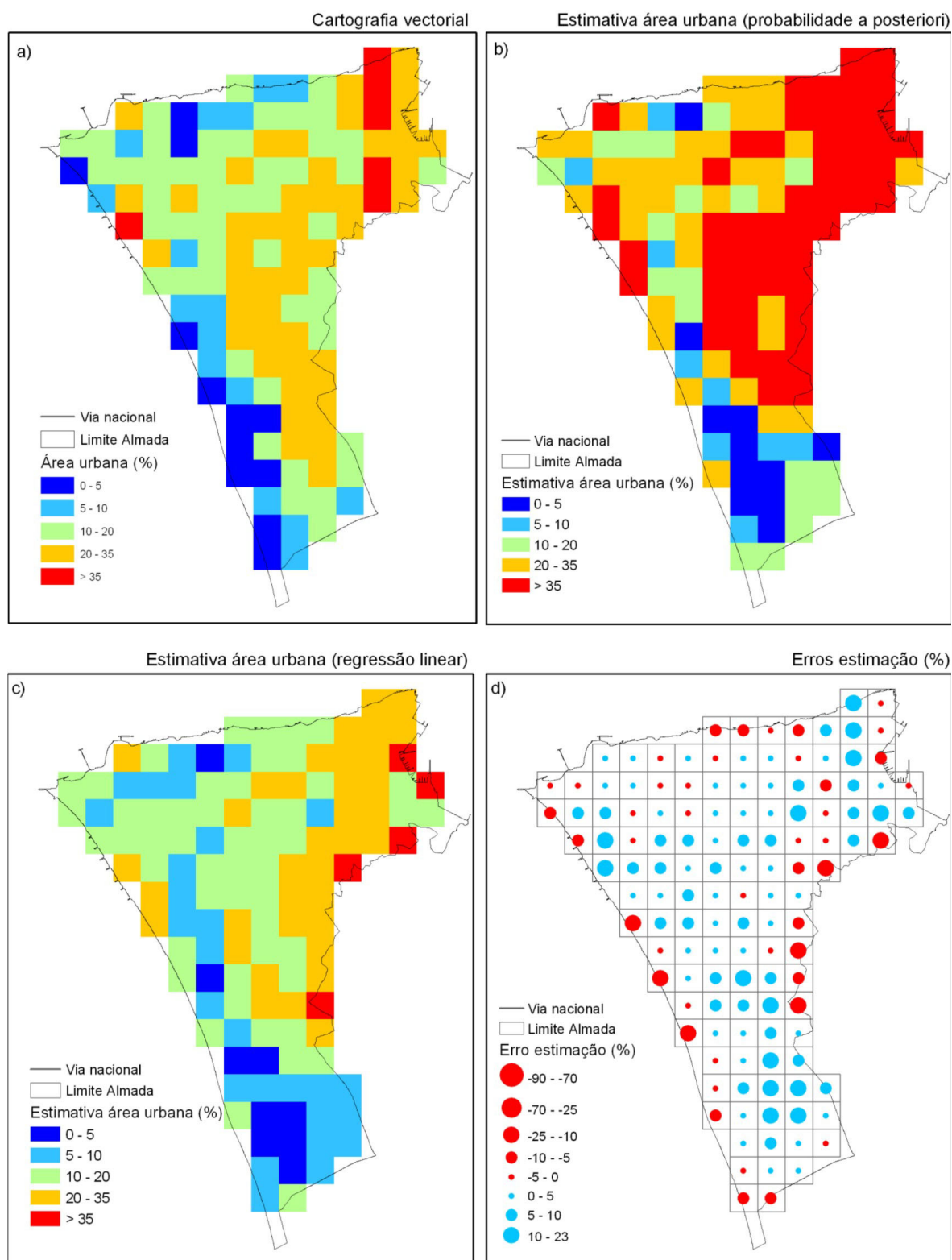


FIGURA 8. Validação de resultados para a quadrícula 750x750 metros: a) fracção de área impermeabilizada calculada com cartografia vectorial; b) fracção de área impermeabilizada estimada por classificação imagem de satélite; c) fracção de área impermeabilizada re-estimada por regressão linear; d) erros de estimação (%).

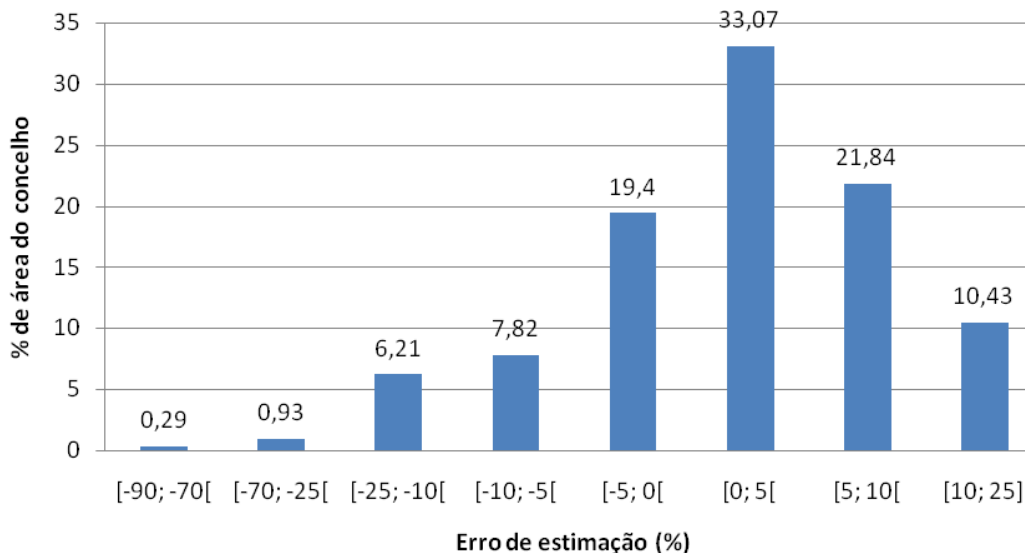


FIGURA 9. Erros de estimação da área impermeabilizada para a área do concelho de Almada (2001).

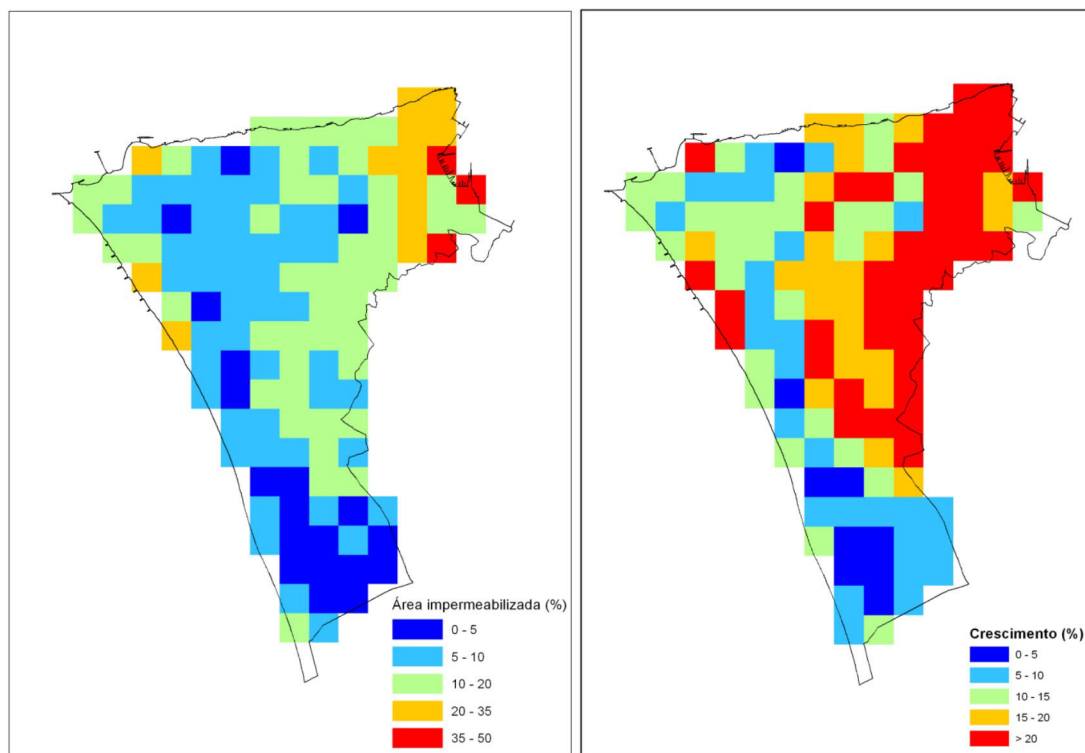


FIGURA 10. Esquerda) Estimativa da fracção da área impermeabilizada em 1987; Direita) crescimento da área impermeabilizada entre 1987 e 2001.

agregados sobre uma quadrícula que permita homogeneizar a diferença de escalas e de incerteza associada.

O estabelecimento de uma lei de regressão linear, entre a informação detalhada das áreas construídas e

o mapa das áreas urbanas obtido pela imagem de satélite permitiu, simultaneamente, validar os resultados da classificação e inferir os quantitativos das áreas impermeabilizadas para uma data anterior (1987), onde não se dispõe de cartografia vectorial detalhada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BRAUN, M. & HEROLD, M. Mapping imperviousness using linear spectral unmixing of ASTER data in the Cologne-Bonn region (Germany). In: SPIE 10th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING, 2003, Barcelona, Spain. **Proceedings...** Barcelona, 2004, 11 p.
2. BURROUGH, P.A. & McDONNELL, R.A. **Principles of Geographical Information Systems**. Oxford, Inglaterra, ISBN: 0-19-823365-5 (paperback), 1997.
3. CARVALHO, J.C. **Simulação estocástica para a calibração de imagens de satélite**. Lisboa, 2002. 150 p. Tese (Mestre em Georrecursos) – Instituto Superior Técnico.
4. EEA. **Urban sprawl in Europe – The ignored change**. Publications of the European Communities. Copenhagen, ISBN 92-9167-887-2, ISSN 1725-9177, 2006.
5. JENSEN, J.R. **Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective**. 2nd. Ed., Saddle River, N. J., Prentice Hall, 316 p., 1996.
6. LAMAS, P. **Os taludes da margem sul do Tejo. Evolução geomorfológica e mecanismos de rotura**. Monte da Caparica, 1998. 379 p. Tese (Doutoramento em Geologia) – Universidade Nova de Lisboa.
7. LILLESAND, T.M. & KIEFER, R.W. **Remote sensing and image interpretation**. New York: John Wiley, 3rd ed., 750 p., 1994.
8. MARKHAM, B.L. & BARKER, J.L. Radiometric properties of U.S. processes Landsat MSS data. **Remote Sensing of Environment**, v. 17, p. 39-71, 1987.
9. MATOS, J.L. **Fundamentos de informação geográfica**. Lidel, Lisboa, 326 p., 2001.
10. NETZBAND, M.; STEFANOV, W.L.; REDMAN, C.L. Remote sensing as a tool for urban planning and sustainability. In: NETZBAND M.; STEFANOV W.L.; REDMAN, C. (Eds.), **Applied Remote Sensing for Urban Planning, Governance, and Sustainability**. Berlin: Springer, p. 1-23, 2007.
11. QUINTELA, A.C. **Hidráulica**. Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, 539 p., 1996.
12. RIBEIRO, A.; ANTUNES, M.T.; FERREIRA, M.P.; ROCHA, R.; SOARES, A.F.; ZBYSZEWSKY, G.; ALMEIDA, F.M.; CARVALHO, D.; MONTEIRO, J.H. **Introduction à la Géologie Générale du Portugal**, Serviço Geológico de Portugal, Lisboa, 114 p., 1979.
13. SABINS, F.F. **Remote Sensing: Principles and Interpretations**. New York: W.H. Freeman, 3^a ed., 432 p., 1997.
14. SILVA, A.P. **Cartografia Geotécnica do Concelho de Almada e o Sistema de Informação Geo-Almada**. Monte da Caparica, 2003. 343 p. Tese (Doutoramento em Geotecnia) – Universidade Nova de Lisboa.
15. TSO, B. & MATHER, P.M. **Classification Methods for remotely sensed data**. New York: Taylor & Francis, 332 p., 2001.
16. ZBYSZEWSKY, G. **Notícia explicativa da carta geológica de Portugal na escala 1:50 000, folha 34-C (Lisboa)**, Serviço Geológico de Portugal, Lisboa, 93 p., 1963.

Manuscrito Recebido em: 3 de agosto de 2009

Revisado e Aceito em: 21 de dezembro de 2009