

Uso da banda termal do satélite LANDSAT-5 e técnicas de geoestatística na estimativa da degradação da Atrazina no solo em diferentes épocas do ano

Diego Augusto de Campos Moraes¹
Wilson Anderson Holler²
Claudio Aparecido Spadotto²
Ronaldo Porto Madureira¹
Paulo Roberto Rodrigues Martinho²
Célia Regina Lopes Zimback¹

¹Universidade Estadual Paulista- Faculdade de Ciências Agronômicas - UNESP/FCA
Caixa Postal 237 - 18610-307 - Botucatu - SP, Brasil
diegomoraes@fca.unesp.br, ronaldomadureira22@yahoo.com.br, czimback@gmail.com

²Embrapa Gestão Territorial
Av. Soldado Passarinho, 303, Fazenda Chapadão- Campinas - SP, Brasil
wilson.holler@embrapa.br, claudio.spadotto@embrapa.br, paulo.martinho@embrapa.br

Abstract. Improper use of pesticides can lead to significant environmental impacts, such as contamination of various environmental compartments, been the most vulnerable, the aquatic compartments. The degradation rate defines the persistence of a pesticide in the soil profile. The temperature is a factor that causes effects on the degradation rate of pesticides, changing the speed of the metabolism of microorganisms. The thermal band of LANDSAT-5 satellite is able to obtain the estimated temperature of the soil surface. This study aims to assess the employability of thermal band of LANDSAT-5 satellite and geostatistical techniques, to obtain estimates of the degradation rate of Atrazine on two different dates in the year 2010. To obtain the results was performed a geometric and atmospheric correction of the images, together with the results of vegetation index and the use of mathematical models. It can be concluded that the use of thermal band of LANDSAT-5 satellite captured by the sensor TM and geostatistical techniques have contributed greatly to obtain the estimate of the rate of atrazine degradation in the soil surface. Using non-intrusive techniques (remote) to simulate the degradation rate of a pesticide helps to consider its use in places and times of year, indicating regions suitable for your use.

Palavras-chave: Remote sensing, behavior of pesticides in environmet, kriging, Sensoriamento remoto, comportamento dos defensivos agrícolas no ambiente, krigagem

1. Introdução

Os herbicidas são apontados como o grupo de defensivos agrícolas mais frequentemente detectado em estudos de qualidade de águas superficiais e subterrâneas (CARTER, 2000). A persistência de um defensivo agrícola no solo depende de processos de dissipação, como a degradação, que os microrganismos do solo (NAKAGAWA, ANDRÉA, 2000). Um dos fatores presentes na degradação de um defensivo agrícola no solo é a temperatura, uma vez que essa afeta a velocidade do metabolismo dos microrganismos envolvidos nesse processo (SPADOTTO *et al.*, 2010). Diversas são as formas de obter a temperatura da superfície do solo. Uma delas é o uso da banda termal do satélite LANDSAT-5, sensor TM, que permite, remotamente, a obtenção da estimativa da temperatura do solo por meio da transformação do número digital da imagem (ND) em radiância. Paraíba e Spadotto (2002) estudaram o efeito da temperatura no processo de degradação de defensivos agrícolas. No entanto, a coleta e as análises são pontuais nas áreas de estudo, sendo de suma importância conhecer o comportamento da distribuição espacial dos dados obtidos, o que é possível pela geoestatística.

O objetivo do presente trabalho foi verificar o uso da banda termal (banda 6) do satélite LANDSAT-5 e de técnicas geoestatísticas na obtenção das estimativas da taxa de degradação da Atrazina em duas diferentes datas do ano de 2010.

2. Metodologia de Trabalho

2.1. Área do estudo

O trabalho foi realizado com dados obtidos na Bacia do Rio Pardo, localizada na região centro-sul do Estado de São Paulo e abrange áreas dos municípios de Botucatu e Pardinho. O clima na região é classificado como mesotérmico, com estação mais seca no inverno e identificado como Cwa, segundo a classificação de Köppen, com temperaturas médias anuais em torno de 20°C e o índice pluviométrico entre 1.100 e 1.700 mm anuais.

2.2. Material

Foram utilizadas imagens orbitais do sensor *Thematic Mapper* (TM), a bordo do satélite LANDSAT-5, disponibilizadas pela Divisão de Geração de Imagens (DGI) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Esse sensor opera em sete bandas, sendo que cada banda representa uma faixa do espectro eletromagnético. Foram escolhidas as bandas espectrais do vermelho, infravermelho próximo e termal, com datas de referência de passagens em fevereiro e agosto de 2010, com fator de cobertura de nuvem igual a zero (Tabela 1). O trabalho foi executado no programa ARCGIS 10.1 e em planilha eletrônica.

Tabela 1. Características das imagens utilizadas.

Satélites Sensores	Resolução Espacial (m)	Bandas espectrais	Intervalo Espectral (μm)	Órbita Ponto
LANDSAT- 5/TM	30 X 30	vermelho	0,626 – 0,693	220/076
	30 X 30	infravermelho	0,776 – 0,904	
	120 X 120	termal	10,45 – 12,42	

2.3. Métodos

Os métodos aplicados no estudo são apresentados de forma esquemática na Figura 1. Nela é possível observar a sequência dos passos aplicados para obtenção dos mapas temáticos.



Figura 1. Esquema metodológico

2.3.1. Registro das Imagens

O modelo matemático utilizado para o registro geométrico das imagens foi o polinomial de 3ª ordem e o interpolador para a reamostragem foi o de convolução cúbica com pontos de controle extraídos da rede hidrográfica, malha rodoviária e divisão administrativa (municípios), todos disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), na escala 1:50.000 do ano de 2010, carta de Botucatu 1:10.000 da Coordenadoria de Ação Geográfica do Estado de São Paulo do ano de 1978, além de dados auxiliares provenientes do *Open Street Map* (OSM) de novembro de 2011.

2.3.2. Correção Atmosférica

Operações matemáticas visando à correção atmosférica das imagens são viáveis para inúmeras aplicações que pretendam realizar comparações entre diferentes sensores ou entre imagens obtidas em datas distintas. Este trabalho utilizou o modelo *Dark Object Subtraction* (DOS), que consiste em um modelo simples que corrige o espalhamento atmosférico e estima

a interferência atmosférica a partir dos números digitais (ND) das imagens (Andrade *et al.*, 2010). A correção atmosférica é feita primeiramente calculando a radiância e depois a reflectância. A radiância de cada banda é obtida segundo a Equação 1.

$$L_{\lambda} = \left(\frac{L_{max_{\lambda}} - L_{min_{\lambda}}}{Q_{calmax} - Q_{calmin}} \right) (Q_{cal} - Q_{calmin}) + L_{min_{\lambda}} \quad (1)$$

onde, L_{λ} é a radiância espectral calculada ao nível do sensor (W/m^2 sr μm); $L_{max_{\lambda}}$ é o valor de referência para radiância máxima (W/m^2 sr μm); $L_{min_{\lambda}}$ é valor de referência para radiância mínima (W/m^2 sr μm); Q_{cal} é o valor de intensidade do pixel (NC); Q_{calmax} é o valor de intensidade máxima do pixel (igual a 255 em bandas TM/LandSat5), e Q_{calmin} é valor de intensidade mínima do pixel (igual a 1 em bandas TM/LandSat5).

A reflectância de superfície de cada banda é obtida pela Equação 2.

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda} \cdot d^2}{E_{sun_{\lambda}} \cdot \cos \theta_s} \quad (2)$$

onde, ρ_{λ} é a reflectância de superfície (adimensional); π é a constante matemática, igual a 3,14159 (adimensional); L_{λ} é a radiância espectral calculada ao nível do sensor (W/m^2 sr μm); d^2 é a distância Terra-Sol (unidades astronômicas); $E_{sun_{\lambda}}$ é o valor médio da irradiância solar exoatmosférica ($W/m^2 \mu m$), e $\cos \theta_s$ é o ângulo zenital solar (graus).

Tabela 2. Valores de referência para cálculo da radiância e reflectância para cada banda do sensor TM/Landsat-5

Bandas	De 01/03/1984 a 04/05/2003		Esun (até 04/05/2003)	Após 04/05/2003		Esun (após 04/05/2003)
	Lmín _λ	Lmáx _λ		Lmín _λ	Lmáx _λ	
	W/m ² sr μm		W/m ² μm	W/m ² sr μm		W/m ² μm
1	-1,52	152	1957	-1,52	193	1983
2	-2,84	296,81	1826	-2,84	365	1796
3	-1,17	204,3	1554	-1,17	264	1536
4	-1,51	206,2	1036	-1,51	221	1031
5	-0,37	27,19	215	-0,37	30,2	220
6	1,2378	15,303	-	1,2378	15,303	-
7	-0,15	14,38	80,67	-0,15	16,5	83,44

Fonte: Adaptado de CHANDER (2003)

2.3.3. Estimativa da temperatura da superfície do solo

Para a obtenção da temperatura estimada da superfície do solo foram realizados os seguintes processos: Índice de Vegetação Ajustado para os Efeitos do Solo (*Soil Adjusted Vegetation Index* – SAVI), Índice de Área Foliar (IAF) e cálculo de emissividade de cada pixel (ϵ_{NB}). As imagens resultantes de cada procedimento foram convertidas do formato matricial para vetor tipo ponto para posterior análise geoestatística.

O índice de vegetação SAVI (Equação 3) tem como finalidade reduzir os efeitos da refletividade do solo.

$$SAVI = \frac{(1+L) \cdot \rho_{t,4} - \rho_{t,3}}{(L + \rho_{t,4} + \rho_{t,3})} \quad (3)$$

onde: $\rho_{t,4}$ é a refletividade da banda 4, $\rho_{t,3}$ é refletividade da banda 3 e L o fator de ajuste do solo, sendo que no presente estudo foi utilizado o valor $L=0,5$ (JENSEN, 2009).

O Índice de Área Foliar (IAF) (Equação 4) é resultado da razão entre a área foliar de toda a vegetação por unidade de área utilizada por essa vegetação.

$$IAF = -\frac{\ln\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91} \quad (4)$$

Para a obtenção da temperatura na superfície, é utilizada a equação de Plank invertida, válida para um corpo negro. Como cada pixel não emite radiação eletromagnética como um corpo negro, há a necessidade de introduzir a emissividade de cada pixel no domínio espectral da banda termal imageada pelo canal termal (ϵ_{NB}) (Equação 5).

$$\epsilon_{NB} = 0,97 + 0,00331IAF \quad (5)$$

A temperatura estimada da superfície do solo foi obtida com a Equação 6.

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\epsilon_{NB} K_1}{L_{\lambda 6}} + 1\right)} \quad (6)$$

onde, T_s é a temperatura estimada da superfície do solo, $K_1 = 607,76$ ($Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$), e $K_2 = 1260,56K$ são constantes de calibração da banda termal do LANDSAT TM-5 e $L_{\lambda 6}$ é a radiância espectral da banda termal.

2.3.4. Estimativa da taxa de degradação do defensivo agrícola associada à temperatura

O efeito da temperatura na taxa de degradação de um defensivo agrícola pode ser estimado conforme as Equações 7 e 8, propostas por Paraíba e Spadotto (2002). A Equação 7 apresenta a taxa de degradação de um defensivo agrícola obtida em uma temperatura de referência (laboratório). A Equação 8 apresenta a dependência da taxa de degradação do defensivo agrícola e a temperatura do solo em diferentes profundidades. Neste trabalho foi considerada a temperatura estimada apenas na superfície do solo.

$$k_r = \frac{\ln(2.0)}{t'_{1/2}} \quad (7)$$

onde, k_r é a taxa de degradação de um defensivo agrícola obtida em uma temperatura de referência (laboratório) e $t'_{1/2}$ é a meia-vida do defensivo agrícola em dias.

$$k(z, t) = k_r \exp\left(\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_r + 273} - \frac{1}{T(z, t)}\right)\right) \quad (8)$$

onde, $k(z, t)$ é a taxa de degradação do defensivo agrícola considerando o efeito da temperatura do solo numa determinada profundidade (z) e tempo (t); k_r é a taxa de degradação de um defensivo agrícola obtida em uma temperatura de referência (laboratório); E_a é a energia de ativação do defensivo agrícola ($kJ.mol^{-1}.K^{-1}$); T_r é a temperatura de referência ($^{\circ}C$), R é a

constante universal dos gases ($R=8,314 \times 10^{-3} \text{ kJ.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$) e $T(z,t)$ é a temperatura estimada do solo.

Os autores assumiram que a taxa de degradação obedece a cinética de primeira ordem e que a energia de ativação é constante em toda a faixa de temperatura do ambiente. Os dados da Atrazina utilizados no estudo foram a meia-vida ($t_{1/2}= 60$ dias) e a energia de ativação ($E_a= 96 \text{ kJ.mol}^{-1}$).

2.3.5. Análise geoestatística e elaboração dos mapas

A análise geoestatística foi realizada com intuito de verificar a existência e estimar o grau de dependência espacial entre os pontos observados de temperatura da superfície do solo e taxa de degradação da Atrazina, com base na pressuposição de estacionariedade da hipótese intrínseca, a qual é estimada pela Equação 9, segundo Vieira *et al.* (1983).

$$\gamma(h) = \left(\frac{1}{2N(h)} \right) \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (9)$$

Onde, $N(h)$ é o número de pares experimentais de observações e $Z(x_i)$ e $Z(x_i + h)$ são os pares de pontos separados por uma distância h . Com o ajuste do variograma, por meio de um modelo matemático teórico, é possível estimar os valores calculados de $\gamma^*(h)$ para os coeficientes de efeito pepita (C_0), patamar ($C_0 + C_1$), alcance (a); o Índice de Dependência Espacial (IDE) proposto por Zimback (2001), onde valores menores ou iguais a 25% é considerada fraca; de 26% a 75%, moderada, e maiores ou iguais a 75%, dependência forte. Na elaboração dos mapas temáticos foi utilizada a Krigagem como o método de interpolação.

3. Resultados e Discussão

Os dados referentes à temperatura da superfície do solo e da taxa de degradação da Atrazina para fevereiro e agosto de 2010 estão na Tabela 3.

Tabela 3. Dados estatísticos para temperatura estimada na superfície do solo e taxa de degradação estimada para Atrazina

Data	Temperatura estimada da superfície do solo (K)			Taxa de degradação estimada da Atrazina (k)		
	Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo	Média
Fevereiro/2010	292,88	308,53	297,11	0,010	0,084	0,020
Agosto/2010	286,21	302,22	294,28	0,004	0,038	0,014

Nota-se a presença de temperaturas mais elevadas no mês de fevereiro em comparação ao mês de agosto, e que esse comportamento também ocorreu para a taxa de degradação da Atrazina na superfície do solo.

Em relação à análise geoestatística, nas Figuras 2 e 3 são apresentados os variogramas referentes à temperatura estimada da superfície do solo nos meses de fevereiro e agosto, respectivamente. Nas Figuras 4 e 5 são apresentados os variogramas da taxa de degradação da Atrazina nos meses de fevereiro e agosto, respectivamente.

Na Tabela 4 e 5 encontram-se os valores obtidos na análise geoestatística para os meses de fevereiro e agosto de 2010, respectivamente.

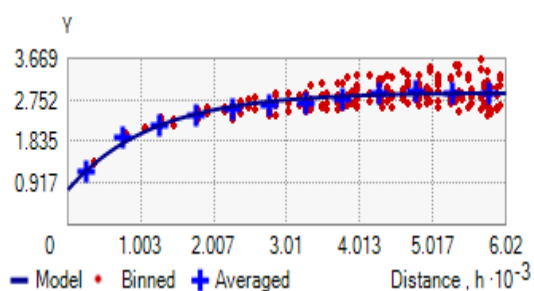


Figura 2. Variograma da temperatura estimada da superfície do solo no mês de fevereiro/2010

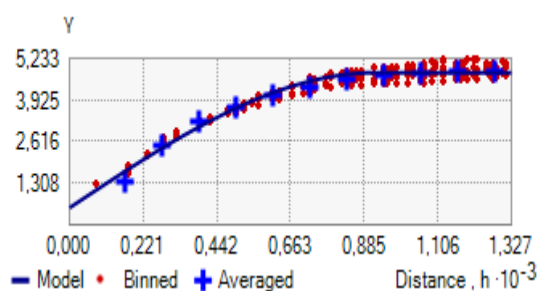


Figura 3. Variograma da temperatura estimada da superfície do solo no mês de agosto/2010

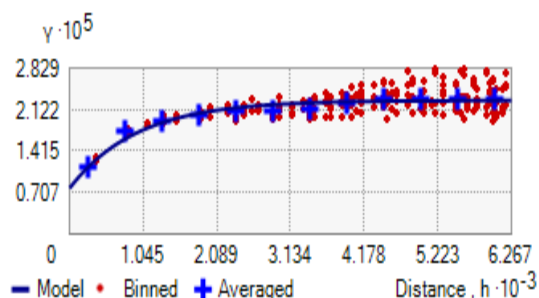


Figura 4. Variograma da taxa de de gradação estimada para Atrazina superfície do solo no mês de fevereiro/2010

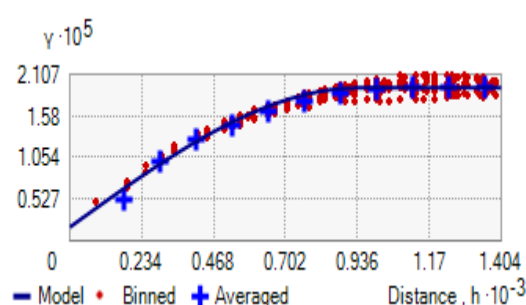


Figura 5. Variograma da taxa de de gradação da Atrazina estimada da superfície do solo no mês de agosto/2010

Tabela 4. Parâmetros e modelo de ajuste dos variogramas para a temperatura estimada na superfície do solo

Data	Modelo	A ₀ (m)	C ₀	C	IDE (%)
Fevereiro/2010	Exponencial	3491,00	0,77	2,14	73,53
Agosto/2010	Esférico	914,66	0,54	4,24	88,70

A₀: Valor do alcance obtido; C₀: Efeito Pepita; C: Componente Estrutural; IDE: Índice de Dependência Espacial.

Tabela 5. Parâmetros e modelo de ajuste dos variogramas para a taxa de de gradação estimada para Atrazina na superfície do solo

Data	Modelo	A ₀ (m)	C ₀	C	IDE (%)
Fevereiro/2010	Exponencial	2865,36	7,84E-06	1,49E-05	65,52
Agosto/2010	Esférico	939,51	1,76E-06	1,76E-05	90,90

A₀: Valor do alcance obtido; C₀: Efeito Pepita; C: Componente Estrutural; IDE: Índice de Dependência Espacial.

Os variogramas ajustaram-se aos modelos exponencial e esférico, obtendo um alcance que variou de 914,66m a 3491,00m. O efeito pepita apresentou valores baixos e o Índice de Dependência Espacial (IDE) variou de 65,52% a 90,90%, caracterizando uma dependência espacial de moderada a forte entre as amostras (ZIMBACK, 2001).

Os mapas das estimativas de temperatura da superfície do solo são apresentados nas Figuras 6 e 8, para os meses de fevereiro e agosto de 2010, respectivamente. Nas Figuras 7 e 9 são apresentados os mapas das estimativas da taxa de de gradação da Atrazina para os meses de fevereiro e agosto de 2010, respectivamente.

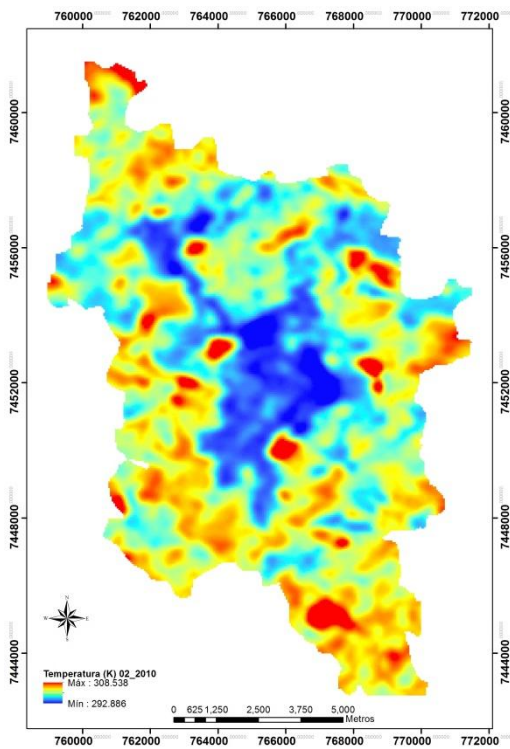


Figura 6. Mapa da temperatura estimada da superfície do solo no mês de fevereiro/2010

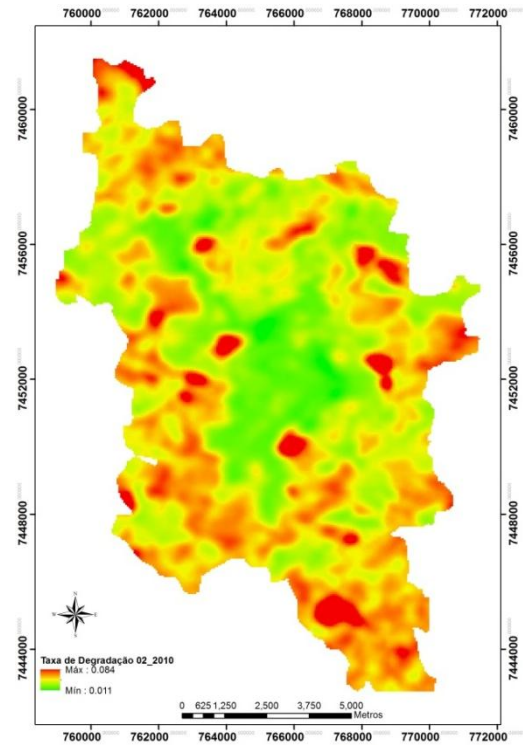


Figura 7. Mapa da taxa de degradação estimada para Atrazina na superfície do solo no mês de fevereiro/2010

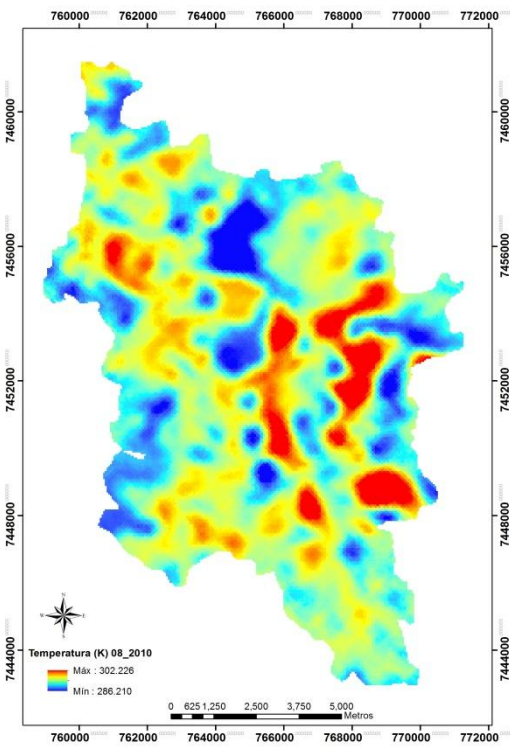


Figura 8. Mapa da temperatura estimada da superfície do solo no mês de agosto/2010

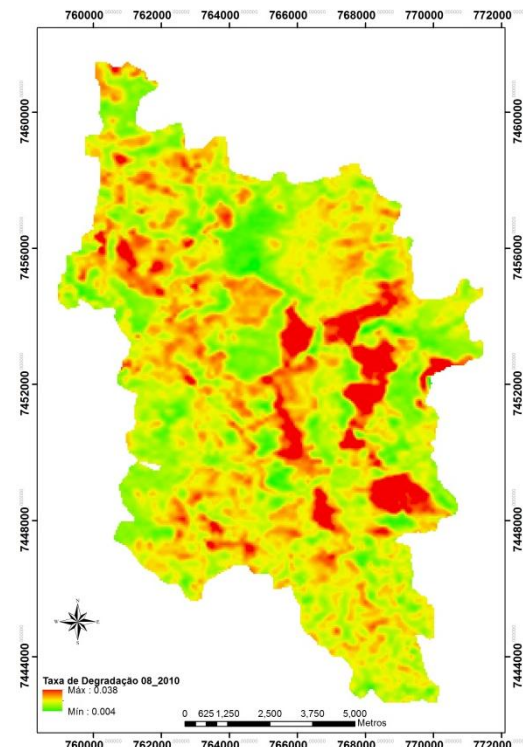


Figura 9. Mapa da taxa de degradação estimada para Atrazina na superfície do solo no mês de agosto/2010

Nota-se que os mapas temáticos proporcionaram uma visualização clara da distribuição espacial das variáveis em estudo e o seu comportamento em diferentes épocas do ano, bem como a nítida relação entre a temperatura e a taxa de degradação da Atrazina, tal como o modelo proposto por Paraíba e Spadotto (2002). Tal fato confirma que a banda termal do satélite LANDSAT-5, que apresenta sensibilidade em relação aos contrastes térmicos de solos, pode ser empregada na obtenção das estimativas da taxa de degradação da Atrazina, e que em conjunto com o processo de interpolação por Krigagem, fornece subsídios importantes para a gestão territorial em cenários de uso de defensivos agrícolas.

4. Conclusões

Em face dos resultados apresentados, pode-se concluir que o uso da banda termal do satélite LANDSAT-5, captada pelo sensor TM, e técnicas de geoestatística mostraram-se viáveis na obtenção da estimativa da taxa de degradação da Atrazina na superfície do solo. A incorporação da dimensão espacial na relação da taxa de degradação da Atrazina e a temperatura são fundamentais para a abordagem das questões ambientais na agricultura, pela sua característica difusa, e aumenta a capacidade de interpretação e de tomada de decisão no contexto territorial. Utilizar técnicas não intrusivas (remotas) para simular a taxa de degradação de um defensivo agrícola ajuda a ponderar seu uso em locais e épocas do ano, indicando regiões apropriadas para seu uso.

5. Agradecimentos

À CAPES pelo apoio financeiro e ao GEPAG e EMBRAPA Gestão Territorial pelo apoio técnico-científico.

6. Referências Bibliográficas

- Carter, A. D. Herbicide movement in soils: principles, pathways and processes. **Weed Res.**, v. 40, p. 113-122, 2000.
- Chander, G. **Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors.** Elsevier, Remote Sensing of Environment, New York, 113, 893-903, 2009.
- Jensen, J.R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres.** São José dos Campos: Parêntese, 2009. 604 p.
- Nakagawa, L. E.; Andréa, M.M.. **Degradação e formação de resíduos não-extraíveis ou ligados do herbicida atrazina em solo.** 2000. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-204X2000000800002&lang=pt>. Acesso em: 28 out. 2012.
- Paraíba, C. L.; Spadotto, C.A. **Soil Temperature effect in calculating attenuation and retardation factors.** Chemosphere 48 905-912, 2002.
- Spadotto, C. A.; Junior, R.P.S.; Dores, E.F.G.C.; Gleber, L.; Moraes, D.A.C.. **Fundamentos e aplicações da modelagem ambiental de agrotóxicos.** Campinas: Embrapa, 2010. 46 p.
- Vieira, S.R.; Hatfield, T.L.; Nielsen, D.R.; Biggar, J.W.. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Berkeley, v. 51, n. 3, p. 1-75, 1983.
- Zimback, C. R. L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade.** 2001. 114 f. Tese (Livre-Docência em Levantamento do solo e Fotopedologia)-Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.