

MAPEAMENTO TEMPORAL DOS ÍNDICES: ÁREA DE SUPERFÍCIE IMPERMEÁVEL E ESCOAMENTO SUPERFICIAL DA ÁREA URBANIZADA DE CAMPO GRANDE - MS

Lorena Avelina Rojas Gutierrez

Engenheira Sanitarista e Ambiental, Mestranda em Engenharia Urbana - UFSCar
lorenavelina@gmail.com

Gustavo Ferreira de Souza

Geógrafo, Mestrando em Engenharia Urbana pela - UFSCar
gustavosalomoni@gmail.com

Gabriel Pereira

Geógrafo, Doutorando em Sensoriamento Remoto - INPE/USP
gabriel@dsr.inpe.br

Antonio Conceição Paranhos Filho

Geólogo, Doutor em Geologia Ambiental (UFPR)
Professor do Departamento de Hidráulica e Transportes - UFMS
toniparanhos@gmail.com

Gilson Arimura Arima

Engenheiro Civil, Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental
Professor do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental - UCDB
gilson@msgas.com.br

Ademir Paceli Barbassa

Engenheiro Civil, Doutor em Hidráulica e Saneamento
Professor do Departamento de Engenharia Civil - UFSCar
barbassa@ufscar.br

RESUMO Esta pesquisa trata de uma investigação quantitativa da impermeabilidade do solo urbano de Campo Grande, Mato Grosso do Sul, frente ao crescimento urbano e à problemática das enchentes, com o objetivo de gerar índices ambientais e analisar a expansão da área urbanizada utilizando sensoriamento remoto. Para acompanhar o comportamento evolutivo da área de estudo com relação aos aspectos ambientais foi realizada uma análise temporal dos índices NVDI (Normalized Difference Vegetation Index), ISA (*Imperveous Surface Area*) e escoamento superficial em um banco de dados sistematizado no programa SPRING 4.3.3, onde delimitou-se o perímetro urbanizado com imagens do satélite Landsat 5, sensor TM, órbita 225, ponto 074, de 20 de abril de 1984 e 2007. Com os resultados da classificação supervisionada manual do uso do solo constatou-se um crescimento de 90% da área urbanizada da cidade entre 1984 e 2007, enquanto que os índices indicaram um aumento das áreas impermeáveis e do escoamento superficial, variando entre 75 e 100% nas áreas que houve expansão e um aumento entre 10 e 15% nas áreas em que a cidade já era urbanizada em 1984 – alterações significativas que implicam em uma maior probabilidade de enchentes em caso de eventos extremos de precipitação.

Palavras-chave: Área de Superfície Impermeável; Satélite Landsat; Sensoriamento Remoto.

Recebido em 27/03/2010
Aprovado para publicação em 18/10/2010

TEMPORAL MAPPING OF THE INDEXES: IMPERVIOUS SURFACE AREA AND SURFACE RUNOFF IN URBANIZED STAIN OF CAMPO GRANDE - MS, BRAZIL

ABSTRACT

This research is a quantitative investigation of the permeability of the urban land cover in Campo Grande City, Mato Grosso do Sul, Brazil, compared to the urban growth and flooding troubles, with the objective of generating environmental indexes and the quantification of the expansion of the urbanized area, using remote sensed data. To follow the evolutionary behavior of the study area regarding the environmental aspects, an temporal analysis of the indexes NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), ISA (Impervious Surface Area) and Surface Runoff of the urbanized area has been done into a database systematized in SPRING software version 4.3.3, with Landsat 5 images, TM sensor, path 225, row 074, of April 20, 1984 and 2007. The results of the classification of land use have shown that in the areas where the city has had expansion from 1984 to 2007, have had a growth of residential areas equivalent to 90%, this has resulted in an increase in runoff about 75 to 100% and in areas where the city has already been urbanized in 1984, an increase of 10 to 15%, which implies in a higher probability of flooding in events of extreme precipitation.

Keywords: Impervious Surface Area; Satellite Landsat, Remote Sensing.

INTRODUÇÃO

A impermeabilização do solo e o aumento do coeficiente de escoamento superficial podem acarretar a transferência de volumes de água cada vez maiores nas bacias hidrográficas para jusante. Do ponto de vista hidrológico, a área com maior risco de inundação assume uma dinâmica de enchente dependendo do estado de ocupação/conservação da bacia hidrográfica. O emprego de geotecnologias para análise temporal de interferências dos processos urbanos em variáveis ambientais, alteradas em função do desmatamento da cobertura vegetal e ocupação desordenada do solo, contribui para a tomada de decisão nos níveis de planejamento e gestão ambiental urbana.

Estudos temporais sobre a influência da impermeabilidade no escoamento superficial urbano que utilizaram imagens do satélite Landsat TM (*Thematic Mapper*), no Brasil, já foram aplicados em Santa Catarina (PEREIRA et al., 2007), São Paulo (COSTA et al., 2005), Rio Grande do Sul (RIBEIRO et al., 2006; RUHOFF, 2007), Paraná (FREITAS et al., 2006) e em Minas Gerais (FURTINI et al., 2007). Existem na literatura diversos métodos para calcular a quantidade de chuva transformada em escoamento superficial. O hidrograma unitário sintético do SCS (*Soil Conservation Service SCS*, 1972) dos Estados Unidos, adaptado para área urbana, estima o número da curva de escoamento superficial "CN", bem como a distribuição e o volume do escoamento superficial de uma área, a partir de modelagem hidrológica (BOUGHTON, 2006; KERKHOVEN e GAN, 2006; MISHRA et al., 2006; YOUNG e CARLETON, 2006) e sensoriamento remoto (RAGAN e JACKSON, 1975; 1980; GILLIES et al., 1997; CARLSON e ARTHUR, 2000; WENG, 2001; MELESSE e SHIH, 2002).

Pretende-se, com este trabalho, determinar as relações entre o crescimento espacial da área urbanizada do Município de Campo Grande (MS) e índices quantitativos ambientais (NDVI - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada, ISA - Área de Superfície Impermeável e Escoamento Superficial) para evidenciar as modificações do

espaço em relação aos aspectos ambientais e mostrar a utilização das ferramentas de geoprocessamento no planejamento da drenagem urbana.

A sede do Município de Campo Grande localiza-se na região central do Estado do Mato Grosso do Sul. Nos corpos d'água localizados na área urbana, nota-se a presença de extensas áreas ocupadas por veredas e de alguns remanescentes florestais nas nascentes (figura 1).

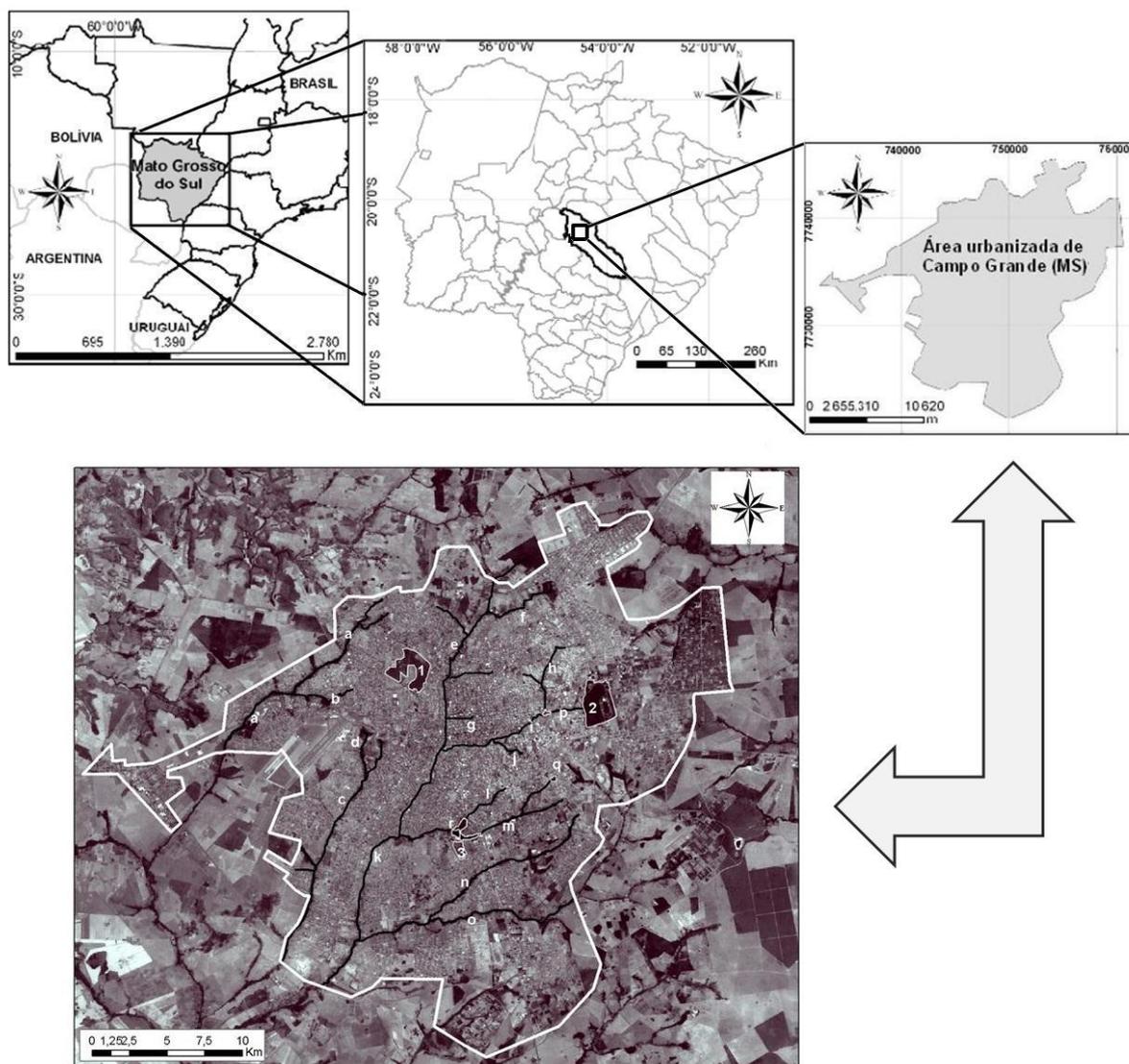


Figura 1. Localização de Campo Grande - MS e representação dos principais cursos hídricos (a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, l, m, n, o), corpos hídricos (p, q, r) e fragmentos florestais (1, 2, 3) obtidos da imagem do satélite Landsat 5, sensor TM, órbita 225, ponto 74, datada de 08/04/2007, projeção UTM, Datum WGS 84, Fuso 21S².

² a: Córrego Imbirussu, b: Córrego Serradinho, c: Córrego Lagoa, d: Córrego Buriti, e: Córrego Segredo, f: Córrego Cascudo, g: Córrego Maracaju, h: Córrego Sóter, i: Córrego Prosa, j: Córrego Vendas, k: Córrego Anhanduí, l: Córrego Cabaça, m: Córrego Bandeira, n: Córrego Bálsamo, o: Córrego Lageado), p: Lago do Parque das Nações Indígenas, q: Lagoa Itatiaia, r: Lago do Amor; 1: Reserva Florestal do exército, 2: Reserva Florestal do Parque dos Poderes, 3: Reserva Florestal da UFMS.

O retângulo envolvente da área de estudo corresponde à área urbanizada e uma pequena parcela de seu entorno, delimitada pela imagem de satélite Landsat, cena 225/74, nas datas 20 de abril de 1984 e 20 de abril de 2007 (LANDSAT, 1984; LANDSAT, 2007), compreendendo uma área total de 390.499,92 ha. Em 1985, a sede do Município de Campo Grande tinha 384.398 habitantes e um perímetro de 28.500 ha (IBGE, 2005; PLANURB, 1999). Em 2007, a sede de Campo Grande tinha 724.524 habitantes e uma área total de 35.302,82 ha (IBGE, 2007; CAMPO GRANDE, 2005).

MATERIAL E MÉTODOS

Foi utilizado o aplicativo SPRING (Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas), na versão 4.3.3 (INPE, 2006) - um *software* gratuito desenvolvido pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) e que oferece recursos para implantação de um SIG (Sistema de Informações Geográficas). Foi criado um banco de dados georreferenciado com duas imagens do satélite LANDSAT 5 TM órbita/ponto 225/74, datadas de 20/04/1984 e 20/04/2007 (LANDSAT, 1984; LANDSAT, 2007) com resolução espacial de 30 metros nas bandas espectrais 1, 2, 3, 4, 5 e 7 e resolução de 120 metros na banda 6 - termal. As imagens de satélite que constituíram a base para gerar o mapeamento temático temporal para o cálculo dos índices foram adquiridas gratuitamente no catálogo de imagens do *site* do INPE. Os roteiros metodológicos do processamento dos dados estão representados na figura 2.

Processamento digital das imagens de satélite

Para o mapeamento temporal da área urbanizada, foi necessário pré-processar as duas imagens de entrada (1984 e 2007) em quatro etapas, conforme descritas a seguir:

(1) Georreferenciamento das imagens com o mesmo sistema de coordenadas, UTM (Universal Transversa de Mercator), *datum* WGS 84 (*World Geographic System* 1984), correção de sistema, grau de polinômio 1 e processo de interpolação por vizinho mais próximo, com a coleta de 15 pontos amostrais equidistribuídos geometricamente e com erro médio quadrático menor que 1 pixel. A imagem Landsat 5 TM de 08/04/2000 (LANDSAT, 2000), disponível no site da NASA, foi utilizada como base cartográfica para o georreferenciamento. A NASA disponibiliza para *download* imagens Landsat de todo o planeta, corrigidas através do processo de ortorretificação utilizando os dados SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), proporcionando maior confiabilidade cartográfica aos dados.

(2) Classificação das imagens pelos processos de segmentação e de classificação. No processo de segmentação das imagens foi adotado o método por crescimento de regiões com suavização de arcos utilizando-se os parâmetros de similaridade 8 e área de pixels igual a 12. Os polígonos gerados pela segmentação foram convertidos em linhas, polígonos e classes, para então serem classificados manualmente, a partir do algoritmo máxima verossimilhança (Max Ver), sendo depois os erros corrigidos matricialmente. A classificação, adaptada das assinaturas espectrais propostas por Paranhos Filho (2000), considerou nove classes temáticas (área urbana, cerrado, cerradão, pasto, mata, água, queimada, área úmida e agricultura).

(3) Correção atmosféricamente através do método aplicativo do modelo de transferência radioativa 6S (*Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum*), proposto por Vermote (1997), que estima a reflectância de superfície a partir do escalonamento dos níveis de cinza (NC) de todas as bandas da imagem-base (2007) e transformação destes em valores de reflectância aparente.

Esta transformação, descrita por Chander e Markham (2003), está representada na equação 1:

$$L_{\lambda} = \left\{ \left[\left(\frac{L_{\lambda \max} - L_{\lambda \min}}{NC_{\max}} \right) * NC \right] + L_{\lambda \min} \right\} \quad (1)$$

Onde $L_{\lambda \max}$ e $L_{\lambda \min}$ representam o valor de máxima e mínima radiância escalonados para cada banda do sensor TM, os quais podem ser encontrados no arquivo descritor das imagens; NC_{\max} representa o nível de cinza máximo; NC representa o nível de cinza de cada pixel da imagem e L_{λ} representa a radiância para a banda expressa em $W/m^2 \cdot sr \cdot \mu m$.

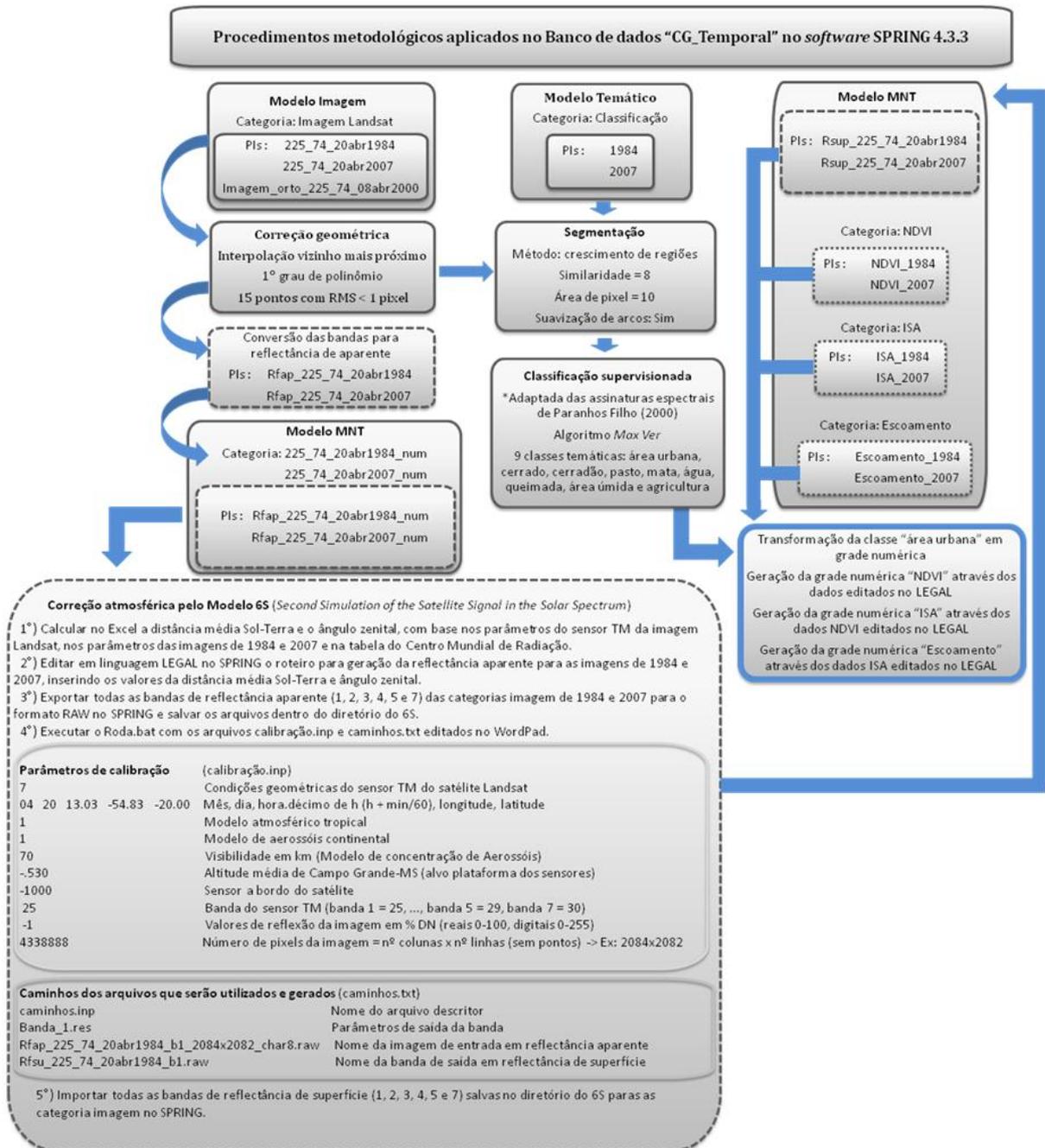


Figura 2. Fluxograma dos roteiros metodológicos aplicados no banco de dados.

Os valores de radiância mínima ($L_{\lambda min}$) e máxima ($L_{\lambda max}$), em $W/m^2.sr.\mu m$, para as bandas do satélite Landsat, sensor TM, segundo Chander e Markham (2003), são: banda 1 ($L_{\lambda min} = -1,52$ e $L_{\lambda max} = 193$), banda 2 ($L_{\lambda min} = -2,84$ e $L_{\lambda max} = 365$), banda 3 ($L_{\lambda min} = -1,17$ e $L_{\lambda max} = 264$), banda 4 ($L_{\lambda min} = -1,51$ e $L_{\lambda max} = 221$), banda 5 ($L_{\lambda min} = -0,37$ e $L_{\lambda max} = 30,2$) e banda 7 ($L_{\lambda min} = -0,15$ e $L_{\lambda max} = 16,5$).

Para o cálculo da reflectância aparente (planetária), a partir da radiância aparente no modelo 6S, foi necessário co-dimensionar espacialmente as duas imagens temporais com o mesmo número de pixels (nº de linhas e colunas), além da inserção de um conjunto de parâmetros iniciais como: modelo atmosférico tropical, modelo de aerossóis continental e visibilidade atmosférica de 70 km. A reflectância aparente é obtida através da equação 2, descrita por Chander e Markham (2003):

$$\rho_p = \frac{\pi \cdot L_\lambda \cdot \left(\frac{d_m}{d}\right)^2}{E_{sol\lambda} \cdot \cos \theta_{zenital}} \quad (2)$$

Em cada banda espectral L_λ representa a radiância aparente de cada pixel (convertido na fórmula 1); d e d_m representam, respectivamente, a distância instantânea e média Sol-Terra em unidades astronômicas; $E_{sol\lambda}$ é a irradiância solar média no topo da atmosfera e $\cos \theta_{zenital}$ representa o cosseno do ângulo zenital.

Na reflectância aparente lê-se a imagem de entrada redimensionada em valores de reflexão entre 0 e 255 (8 bits de dados), onde DN é obtido em valores percentuais: valores reais se concentram no intervalo de 0 a 100, não de 0 a 255. O alvo de altitude da plataforma dos sensores foi a altitude média de Campo Grande, equivalente a 530 metros.

A irradiância média no topo da atmosfera ($E_{sol\lambda}$) foi obtida através da tabela do Centro Mundial de Radiação (*World Radiation Center – WRC*), encontrada no artigo de Chander e Markham (2003). Os valores de irradiância no topo da atmosfera da WRC para os intervalos das bandas do satélite Landsat, sensor TM, segundo Wehrl (1985) citado por Chander e Markham (2003), em $W/m^2.sr.\mu m$, são: de 0,45 – 0,52 μm ($E_{sol\lambda} = 1958,028$), de 0,52 – 0,60 μm ($E_{sol\lambda} = 1848,25$), de 0,63 – 0,69 μm ($E_{sol\lambda} = 1556,55$), de 0,76 – 0,90 μm ($E_{sol\lambda} = 1065,19$), de 1,55 – 1,75 μm ($E_{sol\lambda} = 231,24$), de 2,08 – 2,35 μm ($E_{sol\lambda} = 74,76$).

Os cálculos para distância média Sol-Terra (equação 3), declinação solar (equação 4) e cosseno do ângulo zenital (equação 5) são descritos a seguir:

$$\left(\frac{dm}{d}\right)^2 = 1,00011 + 0,034221 \cdot \cos x + 0,00128 \cdot \text{sen} x + 0,000719 \cdot \cos 2x + 0,000077 \cdot \text{sen} 2x \quad (3)$$

Sendo $x = \left[\left(\frac{360(n-1)}{365} \right) \right]$ onde $n = 110$ representa o dia juliano para 20 de abril.

$$\delta = 23,45 \cdot \text{sen} \left[\frac{360}{365} (284 + n) \right] \quad (4)$$

(5)

$$\cos \theta_{zenital} = \text{sen} \varphi \cdot \text{sen} \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos h$$

Onde φ = latitude em graus e h = ângulo horário.

Após todos esses cálculos, o modelo 6S corrige a imagem dos efeitos atmosféricos.

A seguir, descreve-se a linguagem LEGAL utilizada para a geração da Reflectância Aparente da imagem de 1984, no SPRING:

```
{
//transforma em Radiância Aparente p/ LANDSAT 5
//Metodologia de edição de Flávio Ponzoni

Image Im1, Im2, Im3, Im4, Im5, Im6 ("22574_1984");
Image Im13, Im14, Im15, Im16, Im17, Im18 ("22574_1984");
Digital Im7, Im8, Im9, Im10, Im11, Im12 ("22574_19840420_num");

Im1=Recupere (Nome="22574_1984_B1");
Im2=Recupere (Nome="22574_1984_B2");
Im3=Recupere (Nome="22574_1984_B3");
Im4=Recupere (Nome="22574_1984_B4");
Im5=Recupere (Nome="22574_1984_B5");
Im6=Recupere (Nome="22574_1984_B7");

Im7=Novo (Nome="Rfap_22574_19840420_B1", ResX=30, ResY=30, Escala=50000, Min=0,
Max=255);
Im8=Novo (Nome="Rfap_22574_19840420_B2", ResX=30, ResY=30, Escala=50000, Min=0,
Max=255);
Im9=Novo (Nome="Rfap_22574_19840420_B3", ResX=30, ResY=30, Escala=50000, Min=0,
Max=255);
Im10=Novo (Nome="Rfap_22574_19840420_B4", ResX=30, ResY=30, Escala=50000, Min=0,
Max=255);
Im11=Novo (Nome="Rfap_22574_19840420_B5", ResX=30, ResY=30, Escala=50000, Min=0,
Max=255);
Im12=Novo (Nome="Rfap_22574_19840420_B7", ResX=30, ResY=30, Escala=50000, Min=0,
Max=255);

Im13=Novo (Nome="Rfap_22574_19840420_num_B1", ResX=30, ResY=30, Nbits=8);
Im14=Novo (Nome="Rfap_22574_19840420_num_B2", ResX=30, ResY=30, Nbits=8);
Im15=Novo (Nome="Rfap_22574_19840420_num_B3", ResX=30, ResY=30, Nbits=8);
Im16=Novo (Nome="Rfap_22574_19840420_num_B4", ResX=30, ResY=30, Nbits=8);
Im17=Novo (Nome="Rfap_22574_19840420_num_B5", ResX=30, ResY=30, Nbits=8);
Im18=Novo (Nome="Rfap_22574_19840420_num_B7", ResX=30, ResY=30, Nbits=8);

//Os cossenos devem ser em radianos!
rad=57.302941550999617980389660002547;

zen=37.90034356778/(rad);
pi=3.141592654;
dmax=255;
dist=0.98984865231;

Lmin1=-0.152;
Lmin2=-0.284;
Lmin3=-0.117;
Lmin4=-0.151;
```

Lmin5=-0.037;
Lmin7=-0.015;

Lmax1=15.21;
Lmax2=29.681;
Lmax3=20.43;
Lmax4=20.62;
Lmax5=2.719;
Lmax7=1.438;

esun1=195.7;
esun2=182.6;
esun3=155.4;
esun4=103.6;
esun5=21.5;
esun7=8.07;

```
Im7= (((Lmin1+(Lmax1-Lmin1)*(Digital (Im1/dmax))))*pi*dist^2)/(esun1*cos(zen)))^255;  
Im7= Im7 <= 0 ? 0 : Im7;  
Im13= Imagem (Im7);  
Im8= (((Lmin2+(Lmax2-Lmin2)*(Digital (Im2/dmax))))*pi*dist^2)/(esun2*cos(zen)))^255;  
Im8= Im8 <= 0 ? 0 : Im8;  
Im14= Imagem (Im8);  
Im9= (((Lmin3+(Lmax3-Lmin3)*(Digital (Im3/dmax))))*pi*dist^2)/(esun3*cos(zen)))^255;  
Im9= Im9 <= 0 ? 0 : Im9;  
Im15= Imagem (Im9);  
Im10= (((Lmin4+(Lmax4-Lmin4)*(Digital (Im4/dmax))))*pi*dist^2)/(esun4*cos(zen)))^255;  
Im10= Im10 <= 0 ? 0 : Im10;  
Im16= Imagem (Im10);  
Im11= (((Lmin5+(Lmax5-Lmin5)*(Digital (Im5/dmax))))*pi*dist^2)/(esun5*cos(zen)))^255;  
Im11= Im11 <= 0 ? 0 : Im11;  
Im17= Imagem (Im11);  
Im12= (((Lmin7+(Lmax7-Lmin7)*(Digital (Im6/dmax))))*pi*dist^2)/(esun7*cos(zen)))^255;  
Im12= Im12 <= 0 ? 0 : Im12;  
Im18= Imagem (Im12);  
}
```

Geração dos Índices NDVI, ISA e Escoamento Superficial

Os índices foram gerados para a classe temática “área urbana” a partir da Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico (LEGAL) baseada no banco de dados SPRING, onde os operadores atuam sobre representações de dados dos modelos Numérico, Imagem e Temático.

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) é um cálculo, baseado em várias bandas espectrais, da produção fotossintética (quantidade de vegetação) em um pixel na imagem de satélite. Ele mede em uma área o vigor vegetativo e pode monitorar a cobertura de uma dada superfície a partir das informações espectrais obtidas pelos satélites (ROUSE et al., 1974). Obtêm-se o índice NDVI pela equação 6:

$$NDVI = \frac{IVP - V}{IVP + V} \quad (6)$$

Onde “IVP” representa a faixa do espectro eletromagnético no infravermelho próximo (0,73 µm – 1,3 µm), identificada pela banda 4, e “V” representa a faixa do espectro eletromagnético no vermelho (0,622 µm – 0,700 µm), identificada pela banda 3 (GILLIES, 1997).

Na mesma temática, o Bioma Cerrado é alvo de investigações científicas que utilizam o NDVI e outros satélites, como o MODIS, para monitorar a cobertura vegetal e correlacionar com outros índices (LIESENBERG et al., 2007; CARVALHO et al., 2008).

Com a obtenção dos dados de NDVI, no período de 1984 e 2007, utilizou-se o método descrito por Carlson e Arthur (2000) para obter o índice de Área de Superfície Impermeável (ISA). Este método apresenta a relação entre o índice de vegetação por diferença normalizada e a fração de cobertura vegetal para se chegar à Área de Superfície Impermeável, que indica a superfície que não permite a infiltração de água no solo, altamente relacionada com o escoamento superficial (BAUER et al., 2004). O índice ISA, segundo Carlson e Arthur (2000), é calculado pela equação 7:

$$ISA = \left[1 - \left(\frac{NDVI - NDVI_0}{NDVI_s - NDVI_0} \right)^2 \right]_{dev} \quad (7)$$

Onde “NDVI” representa o índice de vegetação por diferença normalizada, “S” representa os valores para vegetação densa, “O” representa os valores para solo exposto e “dev” indica que a fórmula deve ser utilizada apenas para regiões classificadas como urbanas. O índice varia de 0 a 1, sendo que valores mais próximos de 1 mais impermeável é uma superfície e valores próximo de 0 mais permeável é a superfície (CARLSON e ARTHUR, 2000).

Para edição do roteiro de processamento do ISA em linguagem LEGAL no SPRING utilizaram-se os valores médios de ‘NDVI solo exposto’ e ‘NDVI vegetação densa’ representados na grade NDVI nas imagens de 1984 e 2007. Os valores médios encontrados na imagem de 1984 foram 0,42 (NDVISolo) e 0,86 (NDVIVegden).

O escoamento superficial é a parte da precipitação total em uma área que escoar sobre a superfície do terreno. Quanto maior a impermeabilização superficial, maior é o escoamento superficial (WENG, 2001). O modelo criado pelo Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos (SCS) é amplamente utilizado para estimar o grau de escoamento superficial em qualquer taxa de precipitação. O índice Escoamento Superficial é calculado pela equação 8:

$$Q = \frac{\left[P - 0.2 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \right]^2}{\left[P + 0.8 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \right]} \quad (8)$$

Onde “Q” é o escoamento superficial, “P” é a taxa de precipitação e “CN” é a curva numérica de escoamento, que é uma descrição quantitativa da cobertura ou das condições do solo que afetam o escoamento superficial, estimada através da tabela do SCS (WENG, 2001). Como entrada de dados para as curvas numéricas de escoamento (CN) utilizou-se os valores em porcentagem da área de superfície impermeável (ISA).

A seguir, descreve-se a linguagem LEGAL utilizada no programa SPRING 4.3.3 para a geração dos três índices na imagem de 1984, no SPRING:

```
{
// Índice de Vegetação por Diferença Normalizada, Isa, Escoamento
// Adaptado de Gabriel Pereira (2007)
//Declaração das Variáveis
Imagem Banda3, Banda4 ("L5_20abr84");
Tematico classif ("Classificação");
Numerico NDVI ("NDVI");
Numerico ISA ("ISA");
Numerico Escoamento ("Escoamento");

//Instanciação das Variáveis
Banda3 = Recuperar (Nome="Rs_1984_b3");
Banda4 = Recuperar (Nome="Rs_1984_b4");

//Deve ser alterada de acordo com o ano de estudo
classif = Recuperar (Nome="1984");

// Criacao dos novos PI de NDVI, ISA e Escoamento
NDVI = Novo (Nome="NDVI_1984", ResX=30, ResY=30, Escala = 60000, Min = -1, Max = 1,
Repres = Grade);
ISA = Novo (Nome="ISA_1984", ResX=30, ResY=30, Escala = 60000, Min = 0, Max = 100,
Repres = Grade);
Escoamento = Novo (Nome="Escoamento_1984", ResX=30, ResY=30, Escala = 60000, Min = -
1000, Max = 1000, Repres =Grade);

//Operação para a obtenção do Índice NDVI
NDVI = ( Digital(Banda4) - Digital(Banda3)) / (Digital(Banda4) + Digital(Banda3)) );

//Operação para a obtenção do ISA
//Operação Calculo da superfície impermeável segundo (CARLSON, 2000)
// Valor do NDVI para solo exposto -- varia de acordo com a data
NDVISolo = 0.42;
// Valor do NDVI para vegetação densa -- varia de acordo com a data
NDVIVegden = 0.86;

//Calculo da ISA
ISA = classif.Class=="Urbano" ? ( 1 - ( ( NDVI - NDVISolo) / (NDVIVegden - NDVISolo) )^2
)*100 : 0;

//Calculo do Escoamento Superficial em percentual
//Precipitação em mm
prec = 100;
Escoamento = classif.Class=="Urbano" ? (((prec - (0.2*((1000/ISA) - 10)))^2)/(prec +
(0.8*((1000/ISA) - 10)))): 255;
}
```

RESULTADOS

A variação dos valores de NDVI de 1984 e 2007 está representada na escala de 256 níveis de cinza (0 a 255), variando entre -1 e 1, conforme figuras 3 e 4. Valores próximos de zero até 1 são alvos na superfície sem presença de vegetação, podendo ser área construída, solo exposto, corpo hídrico ou outro objeto na superfície. Já, a variação em tons mais claros com valores próximos de -1 representa detecção de vegetação.

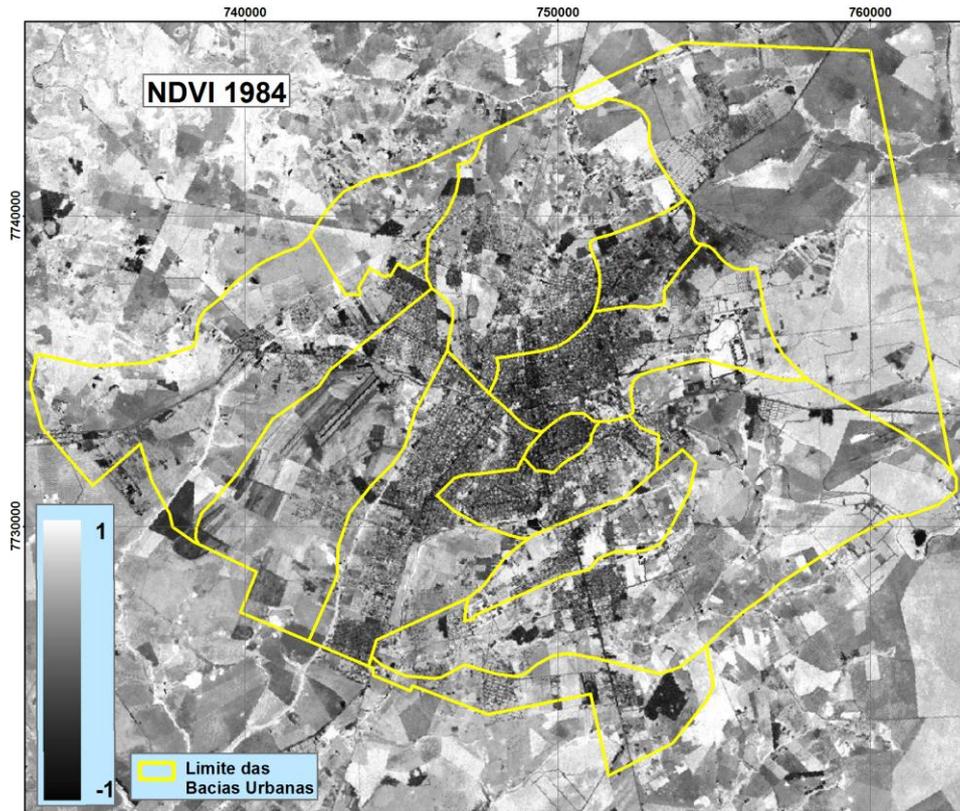


Figura 3. NDVI da área urbanizada de Campo Grande - MS para 20/04/1984.

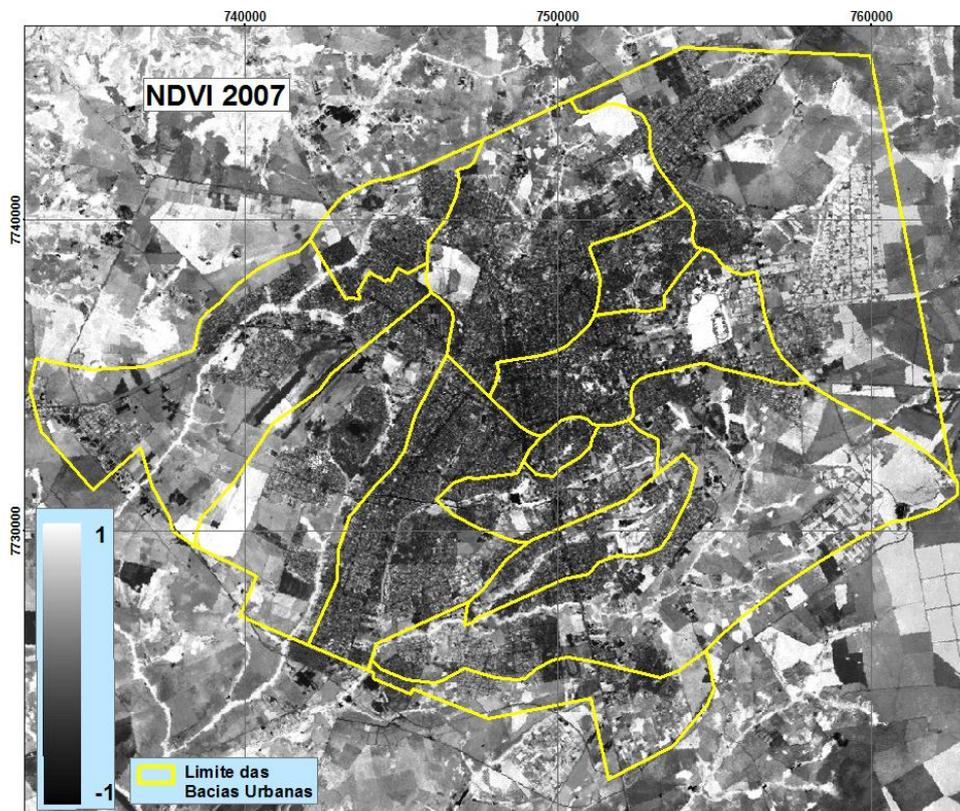


Figura 4. NDVI da área urbanizada de Campo Grande - MS para 20/04/2007

Por conseguinte, mostram-se nas figuras 5 e 6 os dados do Índice de Área de Superfície Impermeável (ISA). A escala de valores do índice ISA varia de zero a próximo de 100 e é expressa em escala de cores na parte inferior da figura. Na escala de cores, as áreas em azul – próximas de zero – indicam áreas altamente permeáveis, com maior índice de infiltração; enquanto que as áreas em verde e amarelo apresentam permeabilidades intermediárias, aproximadamente entre 40 e 80%.

Os dados do índice Escoamento Superficial para os anos de 1984 e 2007 estão representados nas figuras 7 e 8. Considerando que 100 mm de chuva precipitou em Campo Grande, as áreas próximas do vermelho compreendem áreas onde o escoamento variou entre 75 e 100%, o que significa que em uma área que tem 80% de escoamento, dos 100 milímetros que choveu, 80% escoou e os 20% se dividiu entre a evaporação e a infiltração. É assim por toda a variação de cores da escala. Áreas indicadas com a coloração azul são áreas menos impermeáveis, logo, os valores da infiltração são maiores que os do escoamento e da evaporação.

Dada a análise do NDVI de 1984 e 2007 é possível perceber um considerável aumento nos níveis de cinza em tons escuros da imagem de 2007 em relação à 1984, mostrando a diminuição da vegetação na área urbana e entorno, causada pelo desmatamento da cobertura vegetal para ocupação de novos espaços construídos.

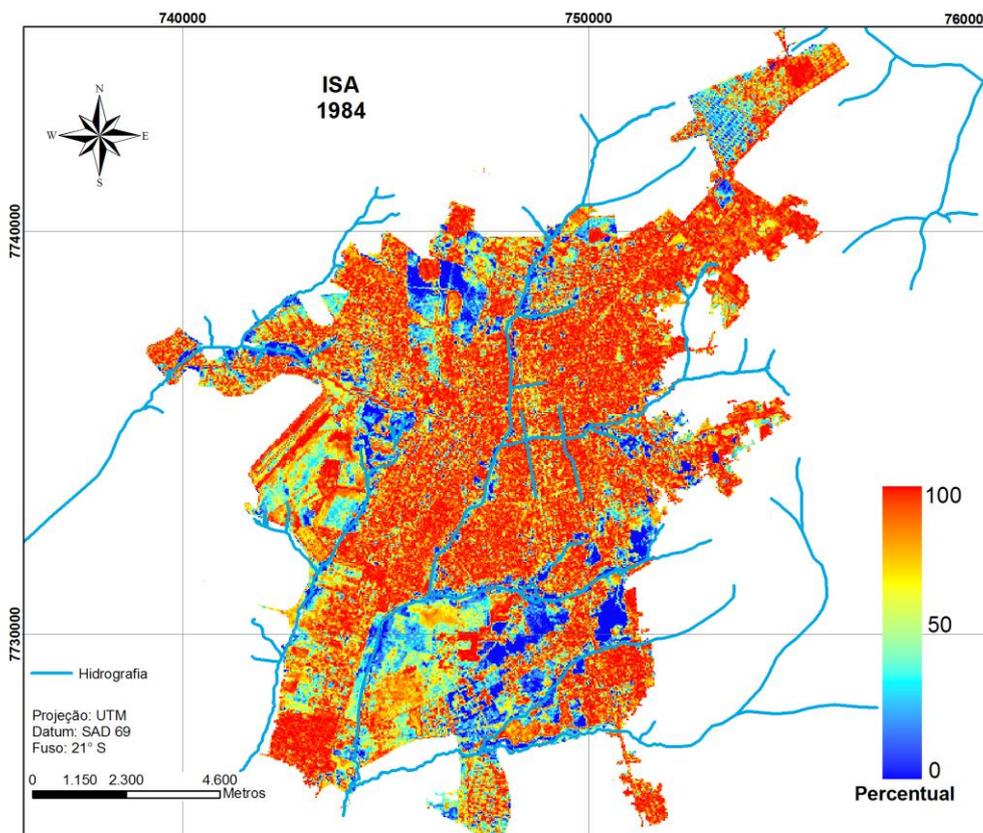


Figura 5. ISA da área urbanizada de Campo Grande - MS para 20/04/1984

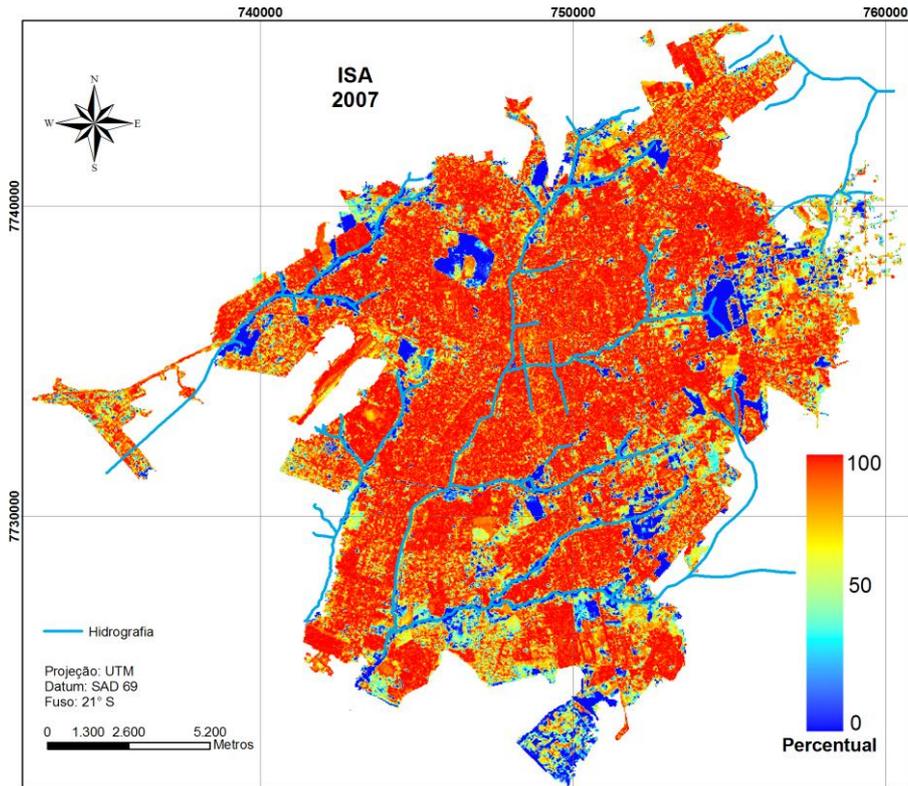


Figura 6. ISA da área urbanizada de Campo Grande - MS para 20/04/2007

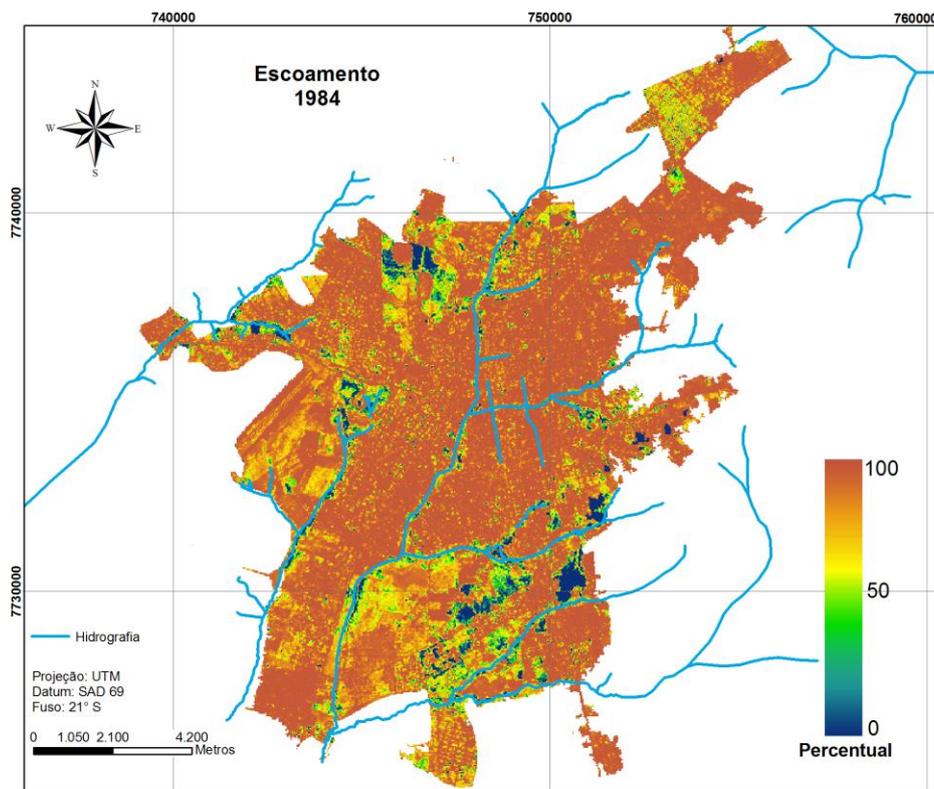


Figura 7. Escoamento Superficial da área urbanizada de Campo Grande - MS para 20/04/1984

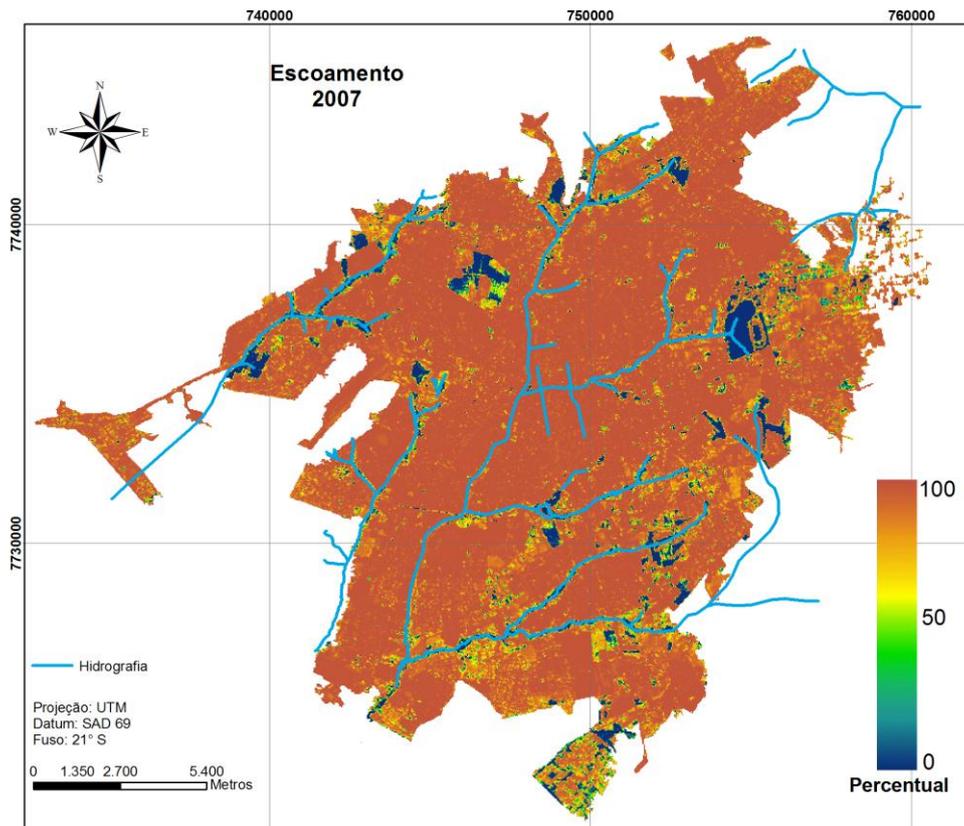


Figura 8. Escoamento Superficial da área urbanizada de Campo Grande - MS para 20/04/2007

A evolução da área de superfície próxima de 100% de impermeabilização, sob indicação da cor vermelha, nos anos de 1984 e 2007, constatou um crescimento acentuado nas áreas já urbanizadas. Em 1984 já existia uma predominância de área de superfície impermeável com baixos valores de permeabilidade na região central da cidade e médios e altos nos extremos da cidade.

Em relação ao escoamento superficial, observa-se predominância da cor laranja em ambas datas e diminuição da cor verde em 2007, o que significa que o escoamento superficial aumentou consideravelmente.

A representação da evolução dos índices ISA e Escoamento da área urbanizada em cada bacia hidrográfica de Campo Grande – MS, de 1984 a 2007, em termos de valores em hectares nos quatro níveis de impermeabilização (25, 50, 75 e 100%) está descrita no quadro 1. Observa-se que as bacias Anhanduí, Bálsamo, Bandeira, Prosa e Sóter atingiram 100% de urbanização, enquanto que a menos urbanizada é a bacia do Coqueiro.

Em comparação com o crescimento de outras capitais, Campo Grande teve um crescimento muito elevado em um curto período, tornou-se uma cidade espacialmente dispersa, considerando sua área em relação à população (20,5 habitantes por hectare), mantendo da década de 80 até hoje os vazios urbanos, como também a concentração de aglomerados residenciais.

CONCLUSÃO

A análise dos resultados deste trabalho evidenciou, sobretudo, que a problemática da impermeabilização do solo interfere diretamente no planejamento e ordenamento do território, onde princípios de sustentabilidade ambiental, como a preservação e ampliação das áreas verdes e o controle do escoamento superficial por técnicas compensatórias em drenagem urbana, devem estar na base de políticas públicas de gestão das cidades. Sugere-se um planejamento do uso e ocupação do solo urbano levando-se em consideração o escoamento natural, se possível, com a recuperação da infiltração. É evidente que no âmbito da drenagem os problemas agravam-se em função da urbanização desordenada.

O papel desempenhado pela análise espacial e temporal da evolução dinâmica de usos do solo urbano através de informações de imagens de satélite orbitais pode contribuir para tomada de decisões urbanísticas e ambientais, possibilitando verificar os usos inadequados do solo e as alterações na cobertura vegetal, bem como as alterações em infraestruturas urbanas.

Verificou-se com as comparações entre os índices de 1984 e 2007 que Campo Grande aumentou as áreas impermeabilizadas e com isso modificou sua paisagem. A metodologia aplicada mostrou-se apropriada para a análise temporal da área de superfície impermeável e do escoamento superficial de Campo Grande, pois demonstrou os efeitos próximos do real.

Como foi mostrado nos mapas, Campo Grande está com altas taxas de impermeabilização e, concomitantemente a esta informação, em todo o período chuvoso (outubro a março) há enchentes na cidade que estão se intensificando a cada ano, pois é uma cidade que está em constante expansão nas periferias e, nos últimos 10 anos, com intensa ocupação dos vazios urbanos da cidade.

A realidade atual de Campo Grande na questão da ocupação dos espaços requer um estudo específico sobre esse processo, mas neste trabalho pode-se afirmar que um dos motivos para o avanço do crescimento da cidade, tanto nas periferias quanto nas áreas do interior da cidade, foi a instituição de uma política pública municipal, iniciada em 2001, que teve como objetivo principal a ocupação dos fundos de vale com avenidas largas e de mão dupla, ao longo dos principais córregos da cidade, o que fez o mercado imobiliário “planejar” construções nos fundos de vale próximos a essas avenidas. Este fato deflagrou um aumento abrupto na carga hídrica dos córregos, diretamente relacionada à diminuição do tempo de concentração na bacia, provocado pela impermeabilização do solo, cujas conseqüências não foram previstas quando houve o “planejamento” do processo de transformação das bacias urbanas de Campo Grande.

Os resultados mostraram que é possível gerar dados quantitativos da impermeabilização urbana a partir de imagens de satélite de média resolução (30 m) e *software* de geoprocessamento gratuitos. Dessa forma, órgãos públicos têm condições de planejar as bacias hidrográficas urbanas de acordo com o estado de impermeabilização do solo, com dados em tempo real, utilizando imagens de satélite de alta resolução (1 m).

AGRADECIMENTOS

Ao INPE pela disponibilização de informações para a realização deste trabalho.

Quadro 1

Valores dos índices ISA e Escoamento em cada bacia hidrográfica de Campo Grande - MS, para os anos de 1984 e 2007

Nome da bacia	Área total (ha) da bacia	Taxas	ISA 1984		ISA 2007		Escoamento 1984		Escoamento 2007	
			Área (ha)	Área total urbanizada	Área (ha)	Área total urbanizada	Área (ha)	Área total urbanizada	Área (ha)	Área total urbanizada
Anhanduí	3301,33	0 - 25%	48,44	3106,47	32,52	3301,33	8,50	3107,19	6,94	3301,33
		25 - 50%	262,10	94,10%	75,27	100,00%	7,29	94,12%	5,05	100,00%
		50 - 75%	636,31		258,10		44,19		19,54	
		75 - 100%	2159,63		2935,45		3047,22		3269,81	
Bálsamo	1218,17	0 - 25%	116,62	717,25	132,48	1218,17	31,08	717,30	63,74	1218,17
		25 - 50%	154,16	58,88%	83,42	100,00%	33,21	58,88%	26,55	100,00%
		50 - 75%	126,24		171,89		69,53		44,57	
		75 - 100%	320,22		830,38		583,48		1083,31	
Bandeira	1601,40	0 - 25%	59,24	1513,96	118,09	1601,40	37,67	1514,12	61,53	1601,40
		25 - 50%	113,96	94,54%	82,44	100,00%	4,77	94,55%	17,83	100,00%
		50 - 75%	158,83		178,66		22,24		39,41	
		75 - 100%	1181,94		1222,21		1449,45		1482,63	
Coqueiro	7539,08	0 - 25%	5,28	685,17	91,28	2590,74	1,46	685,85	24,05	2596,47
		25 - 50%	68,93	9,09%	119,86	34,36%	1,35	9,10%	9,40	34,44%
		50 - 75%	137,24		406,31		3,93		61,33	
		75 - 100%	473,71		1973,29		679,11		2501,68	
Gameleira	1672,73	0 - 25%	3,76	297,81	27,68	694,52	0,72	297,91	9,20	694,59
		25 - 50%	25,27	17,80%	31,27	41,52%	0,41	17,81%	6,19	41,52%
		50 - 75%	64,17		119,78		2,65		13,02	
		75 - 100%	204,61		515,79		294,12		666,17	

Continuação do Quadro 1

Nome da bacia	Área total (ha) da bacia	Taxas	ISA 1984		ISA 2007		Escoamento 1984		Escoamento 2007	
			Área (ha)	Área total urbanizada	Área (ha)	Área total urbanizada	Área (ha)	Área total urbanizada	Área (ha)	Área total urbanizada
Imbirussu	6118,42	0 - 25%	29,03	738,35	250,37	3194,39	10,19	739,41	130,53	3195,85
		25 - 50%	69,13	12,07%	144,22	52,21%	4,74	12,08%	41,45	52,23%
		50 - 75%	133,64		356,97		17,83		81,07	
		75 - 100%	506,55		2442,82		706,65		2942,81	
Lageado	7612,93	0 - 25%	64,73	1630,08	261,22	3729,38	20,19	1631,47	119,50	3730,36
		25 - 50%	230,37	21,41%	230,70	48,99%	11,15	21,43%	42,30	49,00%
		50 - 75%	345,93		634,02		46,60		104,68	
		75 - 100%	989,05		2603,44		1553,53		3463,87	
Lagoa	3816,98	0 - 25%	30,73	1417,48	69,34	1998,98	9,52	1417,69	25,93	1999,88
		25 - 50%	115,34	37,14%	83,28	52,37%	5,02	37,14%	13,61	52,39%
		50 - 75%	366,32		238,13		20,09		29,80	
		75 - 100%	905,09		1608,22		1383,05		1930,55	
Prosa	2551,59	0 - 25%	15,12	1402,51	258,57	2551,59	2,29	1402,61	183,57	2551,59
		25 - 50%	45,17	54,97%	95,61	100,00%	2,46	54,97%	21,45	100,00%
		50 - 75%	116,43		242,86		11,55		51,00	
		75 - 100%	1225,79		1954,55		1386,31		2295,57	
Segredo	4429,51	0 - 25%	79,98	1763,91	273,96	3761,78	16,00	1763,98	136,89	3761,94
		25 - 50%	214,82	39,82%	179,13	84,93%	15,85	39,82%	40,85	84,93%
		50 - 75%	328,41		349,87		59,82		99,73	
		75 - 100%	1140,70		2958,82		1672,31		3484,47	
Sóter	768,41	0 - 25%	3,99	625,51	9,66	768,41	0,21	625,65	2,35	768,41
		25 - 50%	26,08	81,40%	17,13	100,00%	0,59	81,42%	1,95	100,00%
		50 - 75%	44,04		46,47		5,00		4,64	
		75 - 100%	551,40		695,15		619,85		759,46	

REFERÊNCIAS

- BAUER, S.; BALKANSKI, Y.; SCHULZ, M.; HAUGLUSTAINE, D. A.; DENTENER, F. Heterogeneous chemistry on mineral aerosol surfaces: A global modelling study on the influence on tropospheric ozone chemistry and comparison to observations. **Journal of Geophysical Research**, v. 109, 2004.
- BOUGHTON, W. Calibrations of a daily rainfall-runoff model with poor quality data. **Environmental Modelling & Software**, v. 21, p. 1114-1128, 2006.
- CAMPO GRANDE. **Lei Complementar n. 74, de 6 de setembro de 2005**. Dispõe sobre o ordenamento do uso e da ocupação do solo no Município de Campo Grande, e dá outras providências. Campo Grande, MS: PMCG, 2005.
- CARLSON, T. N.; ARTHUR, S. T. The impact of land use — land cover changes due to urbanization on surface microclimate and hydrology: a satellite perspective. **Global and Planetary Change**, v. 25, Issues 1-2, p. 49-65, 2000.
- CARVALHO, F. M. V. de; FERREIRA, L. G.; LOBO, F. C.; DINIZ-FILHO, J. A. F.; BINI, L. M. Padrões de autocorrelação espacial de índices de vegetação Modis no Bioma Cerrado. **R. Árvore**, Viçosa-MG, v. 32, n. 2, p. 279-290, 2008.
- CHANDER, G.; MARKHAM, B. Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures and Postcalibration Dynamic Ranges. **IEEE Trans. Geosc. And Remote Sens.**, v. 41, n. 11, p. 2674-2677, 2003.
- COSTA, H. B.; ROSSI, M.; COELHO, R. M. Mapa de impermeabilização do solo da bacia do Ribeirão das Anhumas, Campinas-SP. In: Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, 11., 2005, São Paulo. **Anais...** São Paulo: USP, p.876-895, 2005.
- FREITAS, V. A. Lima de; RIBEIRO, M. G.; CENTENO, J. A. S. **Análise temporal e quantitativa da impermeabilização dos solos através de imagens LANDSAT e CBERS na cidade de Curitiba/PR**. In: Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário, 2006, Florianópolis. **Anais...** Curitiba: UFPR, 2006.
- FURTINI, M. B.; FERREIRA, E.; SAMPAIO, Fabrício de Menezes Telo. Análise temporal da permeabilidade da superfície urbana da sub-bacia do córrego Centenário em Lavras, MG. **Revista Ciênc. Agrotec.**, Lavras, v. 31, n. 4, p. 1145-1154, 2007.
- GILLIES, R. R., CARLSON, T. N., CUI, J., KUSTAS, W. P., HUMES, K. S. A verification of the triangle method for obtaining surface soil water content and energy fluxes from remote measurements of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and surface radiant temperature. **International Journal of Remote Sensing**, v. 18, p. 3145–3166. 1997.
- GLCF. Global Land Cover Facility [online]. LANDSAT 5 TM. Canais 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7. Imagem de satélite. Órbita 224 ponto 074. De 08 de abril 2000. Maryland: University of Maryland. Disponível em: <<http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>>. Acesso em: 12 abril 2007.
- HALL, F. G.; STREBEL, D. E.; NICKESON, J. E.; GOETZ, S. J. Radiometric Rectification: Toward a Common Radiometric Response Among Multidate, Multisensor Images. **Remote Sensing of Environment**, v. 35, p. 11-27, 1991.
- IBGE (Brasil). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Contagem da população de 1985**. Rio de Janeiro: IBGE, 1985.
- _____. **Censo 2007**. Rio de Janeiro: IBGE, 2007.

INPE (Brasil). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais [online]. SPRING. **Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas. Versão 4.3.3.** São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2006.

KERKHOVEN, E.; GAN, T. Y. A modified ISBA surface scheme for modeling the hydrology of Athabasca River Basin with GCM-scale data. **Advances in Water Resources**, v. 29, p. 808–826, 2006.

LANDSAT 5 TM. Canais 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7. Imagem de satélite. Órbita 224 ponto 074.. De 20 de abril de 1984. INPE: São José dos Campos. CD ROM.

LANDSAT 5 TM. Canais 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7. Imagem de satélite. Órbita 224 ponto 074. De 26 de abril de 2007. INPE: São José dos Campos. CD ROM.

LIESENBERG, V.; PONZONI, F. J.; GALVÃO, L. S. Análise da dinâmica sazonal e separabilidade espectral de algumas fitofisionomias do Cerrado com índices de vegetação dos sensores Modis/Terra e Aqua. **R. Árvore**, Viçosa-MG, v. 31, n. 2, p. 295-305, 2007.

MELESSE, A. M.; SHIH, S. F. Spatially distributed storm runoff depth estimation using Landsat Images and GIS. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 37, p. 173-183, 2002.

MISHRA, S. K.; TYAGI, J. V.; SINGH, R. 2006. SCS-CN-based modeling of sediment yield. **Journal of Hydrology**, v. 324, p. 301-322, 2006.

PARANHOS FILHO, A. C. Análise Geo-Ambiental Multitemporal: o estudo de caso da região de Coxim e bacia do Taquarizinho. 2000. 213 p. Tese de doutoramento – Curso de Pós-Graduação em Geologia, UFPR.

PEREIRA, G.; CAMARGO, F. F.; MORAES, E. C.; OLIVEIRA, L. G. L. de; ADAMI, M. Análise multitemporal da evolução urbana e sua influência na modificação do campo térmico na Região Metropolitana de São Paulo para os anos de 1985, 1993 e 2003. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 5127-5134.

PLANURB. **Campo Grande: 100 anos de história.** Campo Grande: PLANURB, 1999.

RAGAN, R. M.; JACKSON, T. J. Use of satellite data in urban hydrologic models. **Journal of the Hydraulics Division**, ASCE, v. 101, n. HY12, Paper 11790, p. 1469-1475, 1975.

RAGAN, R. M.; JACKSON, T. J. Runoff synthesis using Landsat and SCS Model. **Journal of the Hydraulics Division**, ASCE, v. 106, n. 5, p. 667-678, 1980.

RIBEIRO, R. A.; AYMONE, J. L. F.; LEÃO, S. Z. Aplicação do Geoprocessamento no estudo da impermeabilidade urbana. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Planejamento Urbano e Regional. In: Encontro de Modelagem Computacional, 9. **Anais...** Belo Horizonte: CEFET/MG e IRRJ/UERJ, 2006.

ROUSE, J. M.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W.; HARLAN, J. C. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation. **Final Report Type III.** Greenbelt: NASA/GSFC, 1974. 371 p.

RUHOFF, A. L. Modelagem dinâmica de escoamento superficial na Bacia do Arroio Grande, RS. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 3529-3531.

SCS. Soil Conservation Service. **National engineering handbook**. United States Department of Agriculture (USDA), 1972. (Section 4: Hydrology).

VERMOTE, E. F. *et al.* Second Simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview. **IEEE Trans. Geosc. And Remote Sens.**, v. 35, n. 3, p. 675-686, 1997.

WENG, Q. A remote sensing-GIS evaluation of urban expansion and its impact on surface temperature in the Zhujiang Delta, China. **International Journal of Remote Sensing**, v. 22, p. 1999–2014, 2001.

YOUNG, D. F.; CARLETON, J. N. Implementation of a probabilistic curve number method in the PRZM runoff model. **Environmental Modelling & Software**, v. 21, 1172-1179, 2006.