

Mapeamento e estimativa da área urbanizada do Brasil com base em imagens orbitais e modelos estatísticos

Evaristo Eduardo de Miranda ¹
Eliane Gonçalves Gomes ¹
Marcelo Guimarães ¹

¹ Embrapa Monitoramento por Satélite
Av. Dr. Júlio Soares de Arruda, 803, 13088-300, Parque São Quirino, Campinas, SP
mir@cnpm.embrapa.br; eliane@cnpm.embrapa.br; marcelo@cnpm.embrapa.br

Abstract. This paper presents the methodological steps proposed to estimate Brazilian urbanised area. The methodological approach was based on LANDSAT ETM satellite images, urban population data from Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE), statistical models and geoprocessing procedures. The obtained results (cartographic and numeric) were discriminated by region, state and urban population classes. We present a detailed discussion about the states that compose the so-called “Amazônia Legal”. Brazilian total urbanised area is of 21.285 km²; 2.545 km² are on Amazônia Legal” (12% of Brazilian urbanised area).

Palavras-chave: Brazilian urbanised area, remote sensing; statistical models, área urbanizada do Brasil, sensoriamento remoto, modelos estatísticos.

1. Introdução

Qual a área urbanizada do Brasil? A resposta a essa pergunta não é simples, nem está disponível, principalmente no caso da Amazônia. Trata-se de uma realidade dinâmica, já que o processo de urbanização prossegue, principalmente na Amazônia, e mais de 80% do país vive em áreas urbanas, em geral nas sedes dos 5507 municípios brasileiros.

A realidade da urbanização é extremamente diversificada, pois inclui desde pequenas cidades até grandes aglomerações conurbadas, como é o caso de diversas capitais do país. Por outro lado, uma cidade de 50.000 habitantes na Amazônia não tem a mesma expressão espacial que uma cidade análoga no Nordeste ou na região Sul. As áreas urbanizadas dependem também dos contextos socioeconômicos e ambientais. Se existem alguns determinismos dessa natureza no universo urbano brasileiro, isso deveria ser passível de alguma modelagem quantificada.

Este artigo apresenta os métodos desenvolvidos e empregados para a estimativa da área urbanizada do Brasil, integrando dados censitários, imagens de satélite LANDSAT ETM, procedimentos estatísticos e de geoprocessamento. A integração entre imagens de satélites e dados censitários foi anteriormente usada por Miranda et al. (2003), com o objetivo de comparar os dados referentes à classificação de uso da terra usada pelo IBGE e aqueles interpretados pelas imagens do satélite SPOT *Vegetation*. Na realização desta pesquisa foram assumidas três hipóteses:

- existe uma relação numérica e espacial entre o crescimento da população urbana e a área ocupada pelas cidades;
- essa relação varia também em função de fatores ambientais e socioeconômicos;
- as informações censitárias e orbitais disponíveis são suficientes para estimar as áreas urbanizadas por meio de modelos estatísticos ou medidas diretas.

Os resultados numéricos e cartográficos obtidos, discriminados por região, intervalo ou tamanho de população urbana, para cada um dos municípios do Brasil, permitem explorar um melhor entendimento sobre as relações entre área urbanizada, aumento populacional e contextos econômicos e ambientais, destacando o caso da Amazônia Legal.

2. Material e métodos

2.1. Material

Foram usadas como base de informações: dados censitários de população urbana do Brasil de 2000, em base municipal do IBGE (2003); sedes municipais georreferenciadas a partir dos dados do IBGE; imagens do satélite LANDSAT ETM de todo o país.

No caso específico das imagens de satélite foi usado o acervo da Embrapa Monitoramento por Satélite, composto de 375 cenas LANDSAT ETM, referentes ao período compreendido entre os anos de 2000 e 2001. As imagens foram georreferenciadas banda por banda e mosaicadas, em metodologia semelhante à usada no projeto “Brasil Visto do Espaço” (Miranda, Coutinho, 2004).

2.2. Métodos

Foi realizado um estudo exploratório sobre a distribuição da população urbana brasileira nas unidades da federação e regiões de governo. Este estudo serviu de auxílio à decisão sobre o que mapear e o que estimar, e quais regiões de governo e intervalos de população priorizar. Foram considerados inicialmente os intervalos “menor que 5.000 habitantes”, “entre 5.000 e 20.000 habitantes”, “entre 20.000 e 50.000 habitantes”, “entre 50.000 e 100.000 habitantes”, “entre 100.000 e 500.000 habitantes”, “maior que 500.000 habitantes”.

As regiões Sul, Sudeste e Nordeste concentram o maior número de municípios em todos os intervalos de população urbana (83,7%). As regiões Sudeste e Nordeste concentram a maior parte da população urbana (71,4%). Adicionalmente, em todas as regiões, o maior percentual é o de municípios com população urbana inferior a 5.000 habitantes (42,1%), reunindo 4,7% do total nacional de população urbana, e as cidades com mais de 100.000 habitantes somam 59,1% da população urbana do Brasil.

De posse desses resultados detalhados, foram definidos os estratos de população a serem estudados, ou seja, para os quais seriam obtidos dados amostrais de área urbanizada com uso de imagens de satélite. A estratificação principal foi por tamanho de população, definindo-se quatro casos: população urbana inferior a 5.000 habitantes; população urbana entre 5.000 a 100.000 habitantes; população urbana entre 100.000 a 400.000 habitantes; população urbana superior a 400.000 habitantes. A estratégia de obtenção de dados a partir das imagens do satélite LANDSAT foi específica para cada caso. O estrato secundário foi considerado por região do país.

2.2.1. Caso 1 (limite superior)

Este caso contemplou as cidades com mais de 400.000 habitantes (42), cidades conurbadas nas regiões metropolitanas e capitais (108), em um total de 150 municípios (2,7% do número de municípios), que representam 50,4% da população urbana. A obtenção de dados de área urbanizada no Caso 1 foi feita a partir da medida exaustiva e sistemática em imagens de satélite LANDSAT, para cada município considerado.

2.2.2. Caso 2 (limite inferior)

Neste segundo estrato ficaram as cidades com população urbana inferior a 5.000 habitantes. Estas representam 4,7% da população urbana e 47,9% do total de municípios. Para este estrato foi definida uma amostra aleatória de municípios cujas áreas urbanizadas foram mapeadas a partir de imagens de satélite. Em seguida, foi feito um ajuste estatístico para estes dados (modelo de regressão, em que a variável explicada é a área urbanizada e a explicativa a

população urbana). A área urbanizada dos demais municípios deste estrato foi estimada a partir do modelo gerado.

2.2.3. Caso 3 (intermediário inferior)

O terceiro estrato considerou as cidades com população entre 5.000 a 100.000 habitantes, isto é, 36,2% da população urbana e 48,3% do número de municípios. Neste caso, a metodologia de cálculo da área urbanizada é semelhante à do Caso 2. Foi definida uma amostra aleatória, estratificada por região, seguido do mapeamento das áreas urbanizadas amostradas a partir de imagens de satélite. Foram feitos ajustes estatísticos (modelos de regressão), que permitiram estimar a área urbanizada para os demais municípios não incluídos na amostra.

2.2.4. Caso 4 (intermediário superior)

O quarto estrato englobou os municípios com população urbana entre 100.000 a 400.000 habitantes, que representam 2,9% do número de municípios e 22,3% da população urbana. Este estrato foi dividido em dois subcasos. No primeiro foi feito o mapeamento das áreas urbanizadas metropolitanas e capitais de estado. No segundo foi definida uma amostra aleatória, estratificada por região, para o restante das cidades, mapeando-se as áreas urbanizadas amostradas a partir de imagens de satélite e buscando-se ajustes estatísticos que permitiram a estimativa da área urbanizada para os municípios não mapeados. Na **Figura 1** estão as principais etapas metodológicas empregadas na pesquisa.

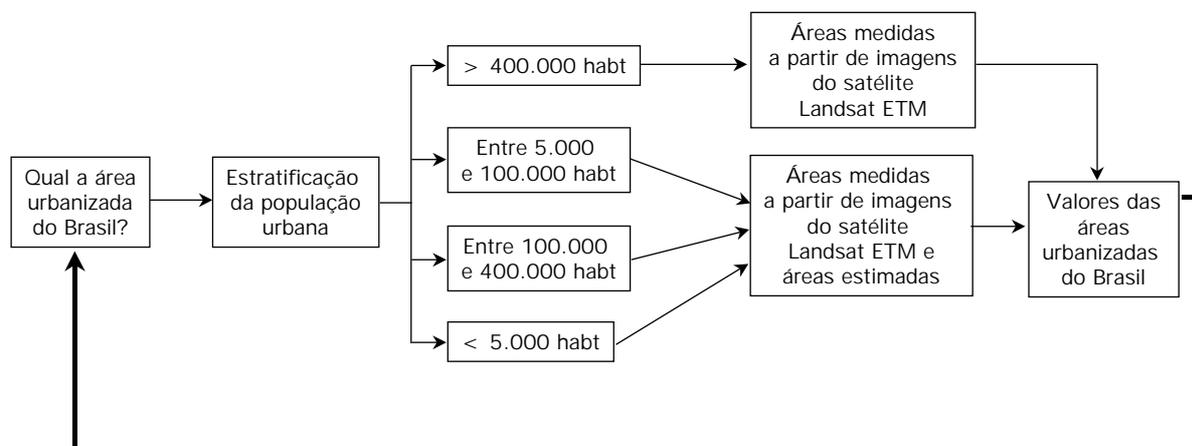


Figura 1: Principais etapas metodológicas para a estimativa das áreas urbanizadas do país.

3. Resultados e Discussão

3.1. Resultados

3.1.1. Caso 1 - Aglomerações com mais de 400.000 habitantes e municípios integrados à regiões metropolitanas

Foram mapeadas nas imagens de satélite LANDSAT ETM as áreas urbanas de municípios com população urbana superior a 400.000 habitantes e os integrados à região metropolitana de capitais (em geral, população urbana inferior a 400.000 habitantes). Eles representam 50,4 % da população urbana do país (150 municípios).

O valor total medido da área urbanizada foi de 10.151 km², dos quais 6.887 km² referentes a municípios com população superior a 400 mil habitantes.

3.1.2. Caso 2 - População inferior a 5.000 habitantes

Os 2640 municípios com população urbana inferior a 5.000 habitantes representam 4,7% da população urbana do país. Para o cálculo foi mapeada a área urbanizada de uma amostra aleatória de 93 desses municípios, considerando um intervalo de confiança de 95%. Foram encontradas algumas dificuldades na estimativa dessas áreas, devido a seu tamanho diminuto e a pouca diferenciação do padrão com o entorno.

Os modelos de regressão linear e quadrática testados consideraram a população urbana como variável independente e a área urbanizada como variável dependente. Não foi obtida correlação significativa. Optou-se pela média como medida de estimativa da área para os municípios com população urbana inferior a 5.000 habitantes não incluídos na amostra. Para os 93 municípios da amostra, a área urbanizada média foi de 0,37 km². Essa medida teve desvio padrão de 0,24 km² e mediana de 0,27 km². O total de área urbanizada obtido para 2640 municípios foi de 1.029 km² (947 km² estimados e 82 km² medidos).

3.1.3. Caso 3 - Cidades com população entre 5.000 e 400.000 habitantes

Os 2824 municípios deste caso foram divididos em duas subpopulações: de 5.000 a 100.000 habitantes (2662 municípios) e de 100.000 a 400.000 habitantes (162 municípios). Para a definição da amostra aleatória-estratificada foi considerado um intervalo de confiança de 95%, que gerou uma amostra de 397 municípios, sendo 336 para a faixa de 5.000 a 100.000 habitantes e 61 entre 100.000 a 400.000 habitantes.

No mapeamento, cada ponto amostral foi identificado geograficamente nas imagens LANDSAT correspondentes. Ocorreram alguns problemas, como municípios cobertos por nuvens e dificuldades no reconhecimento dos padrões de urbanização nas imagens (tamanho diminuto, relevo, confusão com o entorno etc.). Nesses casos foi feita uma reamostragem.

Foram testados modelos de regressão linear e quadrática, que combinaram todas as possibilidades existentes entre as cinco regiões e os dois intervalos de população, gerando um total de 18 equações, validadas uma a uma: dez modelos combinam cinco regiões e dois intervalos de população; cinco modelos contemplam cinco regiões com o total das populações; dois modelos, com dois intervalos de população e todas as regiões confundidas; um modelo global (“tudo contra tudo”). A **Figura 2** ilustra um dos modelos obtidos.

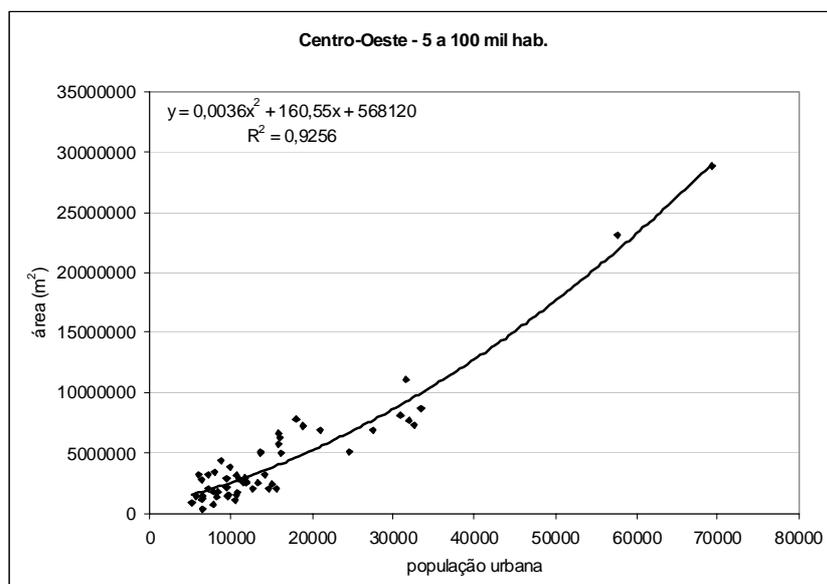


Figura 2: Regressão para municípios da região Centro-Oeste no intervalo de 5 a 100 mil habitantes.

Durante a análise dos modelos de regressão foram encontrados alguns municípios *outliers* (pontos fora do “padrão”). Para todos os casos encontrados havia explicações geográficas coerentes. Tratavam-se, em geral, de municípios turísticos e balneários com extensa área urbanizada e população urbana pequena (população flutuante) ou municípios com complexos industriais, energéticos ou mineradores na área urbana. Para que a amostra fosse mantida homogênea, esses municípios foram retirados dos modelos de regressão.

Foram testados para cada um dos 18 casos, modelos de regressão quadrática e linear. Os critérios de escolha de um modelo para cada caso foram o melhor ajuste e o melhor coeficiente de determinação (R^2). A **Tabela 1** apresenta os modelos selecionados.

Tabela 1: Modelos de regressão selecionados por região de governo.

Região	Modelo
Centro-Oeste	$y=0,00001 x^2+246,15 x+299138$
Nordeste	$y=0,00005 x^2+43,442 x+908242$
Norte	$y=-0,0003 x^2+218,54 x+734410$
Sudeste	$y=-0,0002 x^2+146,65 x+892126$
Sul	$y=0,0001 x^2+153,85 x+1000000$

Com os modelos da **Tabela 1**, foram calculadas as áreas urbanizadas para os municípios não incluídos na amostra. Para o Caso 3, que compreende os municípios com população urbana entre 5.000 e 400.000 habitantes, a área urbanizada total é de 13.370 km² (**Tabela 2**).

Tabela 2: Áreas urbanas em cidades entre 5.000 e 400.000 habitantes, por região de governo.

	5.000 a 100.000 habitantes		100.000 a 400.000 habitantes		
	Estimado	Medido	Estimado	Medido	
Centro-Oeste	764,2	256,8	-	433,0	
Nordeste	1.355,7	239,0	63,7	287,3	
Norte	605,8	213,5	-	354,9	
Sudeste	2.836,6	543,2	254,2	2.024,5	
Sul	1.442,0	553,2	93,3	1.048,9	
Brasil	7.004,3	1.805,7	411,2	4.148,5	13.369,7

3.1.4. Área urbanizada do Brasil

A **Tabela 3** traz os valores obtidos das áreas urbanizadas do Brasil, segundo os estratos de população urbana. A **Tabela 4** traz o percentual de área urbanizada mapeada e o estimado pelos modelos de regressão.

Tabela 3: Áreas urbanizadas do Brasil, segundo os estratos de população urbana.

População urbana (habitantes)	Área (km ²)
> 400.000	6886,6
100.000 a 400.000	4559,8
5.000 a 100.000	8810,0
< 5.000	1028,7
Total	21285,0

Tabela 4: Percentual de áreas urbanizadas mapeadas e estimadas, por região de governo.

Região	Estimado (%)	Mapeado (%)	Região	Estimado (%)	Mapeado (%)
Centro-Oeste	29,8	70,2	Sudeste	34,3	65,7
Nordeste	46,2	53,8	Sul	40,4	59,6
Norte	46,2	53,8	Brasil	37,7	62,3

3.2. Discussão

Foram medidas diretamente com uso de imagens do satélite LANDSAT ETM as áreas efetivamente urbanizadas de 11% do total de municípios, que representam 62,7% população urbana do país. No caso das áreas estimadas, quando ocorreu sobreposição amostral entre os municípios com áreas medidas e estimadas, foi usado o valor da área medida.

A **Tabela 5** mostra a área urbanizada calculada e seu percentual em relação à área total, segundo as regiões de governo. Na **Tabela 6** apresenta-se a densidade demográfica urbana em relação à área total e à área urbanizada de cada região.

Tabela 5: Áreas urbanizadas do Brasil, segundo as regiões de governo.

Região	Área total (km ²)	Área urbanizada calculada (km ²)	% da área total
Centro-Oeste	1.612.077	2.695,8	0,17
Nordeste	1.557.938	3.445,0	0,22
Norte	3.869.638	1.610,9	0,04
Sudeste	927.286	9.404,3	1,01
Sul	564.306	4.129,0	0,73
Brasil	8.531.245	21.285,0	0,25

Tabela 6: Densidades demográficas urbanas por região do país.

Região	População urbana	População urbana/km ² total	População urbana/km ² urbanizado
Centro-Oeste	10.092.976	6,3	3.744,0
Nordeste	32.971.719	21,2	9.570,9
Norte	9.014.365	2,3	5.595,8
Sudeste	65.549.194	70,7	6.970,1
Sul	20.321.999	36,0	4.921,8
Brasil	137.950.253	16,2	6.481,1

As **Tabelas 7 e 8** trazem, para os Estados da Amazônia Legal, informações sobre área urbanizada estimada, número de municípios por Estado e população urbana (IBGE, 2003).

Em relação ao Maranhão vale destacar que os dados dessas tabelas referem-se aos municípios do Estado com coordenadas da sede localizadas geograficamente na Amazônia Legal. O Estado do Maranhão é composto por 217 municípios, que representam 333,4 km² (80,9% da área urbanizada na Amazônia Legal). A população total do Estado é de 5.651.475 habitantes (79,7% na Amazônia Legal) e a população urbana total é de 3.364.070 habitantes (81,1% na Amazônia Legal; 59,5% da população total do Estado).

Tabela 7: Áreas urbanizadas da Amazônia Legal, por Estado.

Estado	Área total (km ²)	Área urbanizada calculada (km ²)	% da área total
Acre	153.150	49,5	0,032
Amapá	143.454	69,3	0,048
Amazonas	1.577.820	395,1	0,025
Maranhão	252.627	414,3	0,164
Mato Grosso	906.807	519,7	0,057
Pará	1.253.165	730,6	0,058
Rondônia	238.513	226,1	0,095
Roraima	225.116	40,7	0,018
Tocantins	278.421	99,6	0,036
Total	5.029.072	2.544,9	0,051

Tabela 8: Densidades demográficas e urbanas por Estado da Amazônia Legal.

Estado	População urbana	População urbana/km ² total	População urbana/km ² urbanizado
Acre	370.267	2,4	7.481,8
Amapá	424.683	3,0	6.128,2
Amazonas	2.107.222	1,3	5.333,4
Maranhão	2.729.835	10,8	6.589,0
Mato Grosso	1.987.726	2,2	3.825,1
Pará	4.120.693	3,3	5.639,8
Rondônia	884.523	3,7	3.912,1
Roraima	247.016	1,1	6.075,0
Tocantins	859.961	3,1	8.633,0
Total	11.002.091	2,2	4.323,0

Na **Tabela 9** são resumidas as densidades demográficas das populações urbanas para cada Estado da Federação, ordenadas de forma crescente. A menor densidade urbana foi observada no Distrito Federal (3.157,8 habitante/km² urbanizado) onde pesa todo o modelo arquitetural e urbanístico de Brasília com seus amplos espaços, áreas verdes etc., bem como o baixo índice de verticalização das cidades satélites. O Mato Grosso apresenta o mesmo padrão de cidades amplas e pouco verticalizadas com 3.825,1 habitante/km² urbanizado.

No outro extremo, estão cinco estados nordestinos de Pernambuco, Bahia, Ceará, Alagoas e Sergipe, com as maiores densidades urbanas observadas entre 12.000 e 9.000 habitantes por km² urbanizado.

Tabela 9: Densidades demográficas urbanas por Estado da Federação.

UF	População urbana/km ² urbanizado	UF	População urbana/km ² urbanizado	UF	População urbana/km ² urbanizado
DF	3.157,8	ES	5.760,2	TO	8.633,0
MT	3.825,1	MG	5.808,9	RJ	9.339,3
RO	3.912,1	RR	6.075,0	AL	9.498,8
GO	3.947,9	AP	6.128,2	SE	10.730,4
MS	3.959,0	PI	6.454,3	CE	11.279,3
SC	4.802,7	MA	6.567,1	BA	11.499,4
PR	4.854,9	SP	6.958,9	PE	11.844,9
RS	5.050,4	AC	7.481,8	Total	6.481,1
AM	5.333,4	RN	7.554,3		
PA	5.639,8	PB	7.643,6		

A **Figura 3** ilustra a distribuição das densidades de populações urbanas nos Estados, centradas num valor médio nacional de 6.481 habitante/km² urbanizado.

4. Conclusões

A urbanização é um dos processos marcantes dos 5507 municípios brasileiros nos últimos 30 anos. Além do fator “tamanho das populações”, mesmo para um nível populacional equivalente, a área urbanizada pode variar muito em função do contexto regional. Se o conceito de população urbana é passível de questionamentos, a mancha física das áreas urbanas é um dado inequívoco em imagens de satélite.

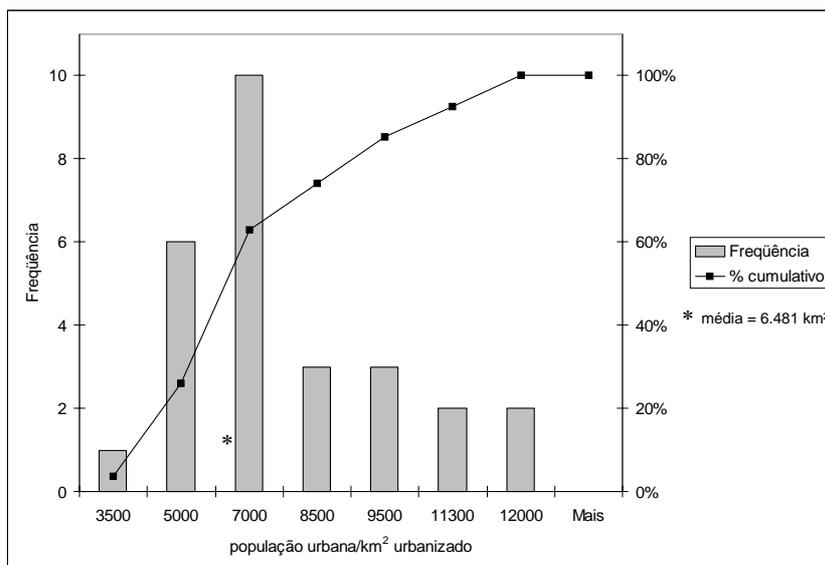


Figura 3: Distribuição da densidade populacional urbana nos Estados.

Esta pesquisa detectou, quantificou, cartografou e/ou representou a totalidade das áreas urbanizadas do Brasil, com base em imagens do satélite LANDSAT ETM de todo país e nos dados censitários do IBGE de 2000. Ela integrou métodos de tratamento de imagens digitais, dados geocodificados, e aplicou procedimentos estatísticos.

Os resultados numéricos e cartográficos foram discriminados por região e tamanho de população urbana. Dezoito modelos de regressão linear e quadrática foram desenvolvidos sobre as relações entre área urbanizada e tamanho populacional, validados em contextos regionais diferenciados, com uma análise específica para a Amazônia Legal.

As áreas urbanizadas medidas diretamente representaram 62,3 % do total, 62,7% da população urbana e 11% dos municípios. A área urbanizada do Brasil foi calculada em 21.285 km² e da Amazônia Legal em 2.545 km² (12% do total do país). A densidade média de população urbana por km² urbanizado no país é de 6.481,1 habitantes, variando entre extremos de 11.844,9 habitantes em Pernambuco a 3.157,8 no Distrito Federal. As maiores densidades estão no Nordeste e as menores na região Centro Oeste.

Toda a base municipal e estadual de dados numéricos e cartográficos obtidos está disponível na Embrapa Monitoramento por Satélite para uso de pesquisadores trabalhando com a temática do planejamento e ordenamento territorial.

Referências

Instituto Brasileiro De Geografia Estatística.. Banco de Dados Agregados – Sistema IBGE de Recuperação Automática, **Censo Demográfico de 2000 – Resultados do Universo**, 2003. Acesso em: 10 jan. 2003. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/pesquisas/cdru/default.asp>>

Miranda, E. E. de; Coutinho, A. C. (Coord.). **Brasil Visto do Espaço**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2004. Disponível em: <<http://www.cdbrazil.cnpem.embrapa.br>>. Acesso em: 7 out. 2004.

Miranda, E. E. de; Guimarães, M.; Gomes, E. G. G.; Dorado, A. J. A comparison between GLC2000 results and Brazilian Census Data. In: WORKSHOP GLOBAL LAND COVER 2000, March 2003, Ispra. **Abstracts...** Italy: European Commission-JRC, 2003. p. 27.