

# Alteração na relação entre densidade habitacional x área impermeável: Porto Alegre-RS

Frederico Carlos Martins de Menezes Filho  
Carlos Eduardo Morelli Tucci

**RESUMO:** A relação entre densidade populacional e área impermeável é utilizada para prognóstico da futura área impermeável de uma bacia hidrográfica com base na previsão da densidade de ocupação do Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano. Estas relações foram determinadas nos Estados Unidos na década de 70 e no Brasil na década de 80 e 90. Nestes estudos admitiu-se que esta função se mantém ao longo do tempo. No entanto, esta relação pode mudar devido ao seguinte: (a) redução da fertilidade e alteração da densidade populacional; (b) aumento da impermeabilização em áreas já ocupadas; (c) melhoria tecnológica nas metodologias de determinação da área impermeável.

Campana e Tucci (1994) obtiveram uma relação deste tipo a partir de dados das cidades de Porto Alegre, São Paulo e Curitiba. Esta relação tem sido utilizada largamente no Brasil em Planos de Drenagem. Neste artigo esta relação é revista utilizando dados demográficos atuais da cidade de Porto Alegre e uma imagem de satélite com alta resolução espacial.

Os dados censitários mostram forte redução de fertilidade nas últimas décadas e redução da densidade habitacional, refletindo na relação em estudo. A densidade habitacional para uma mesma área impermeável diminuiu. Estes resultados mostram que a relação entre densidade habitacional e área impermeável deve ser atualizada para considerar a evolução demográfica e de infraestrutura das cidades.

**PALAVRAS-CHAVE:** área permeável, densidade habitacional, classificação rígida.

**ABSTRACT:** Urban density and impervious area relationship is used to forecast the impervious area of future development based on Urban Master Plans. These relationships were developed in the 70's in USA and 80's and 90's in Brazil. These studies assumed that the relationships would not change along the time. However, this relationship could change due to the following: (i) reduction of fertility and change in the density; (ii) increase of impervious areas on the existing occupied area; (iii) improvement on the techniques to assess the impervious area.

Campana and Tucci (1994) developed a function between Urban density and impervious area using data from Porto Alegre, São Paulo and Curitiba. This relationship has been used in Urban Drainage Plans along Brazil. In the present work, an update of this relationship is presented, taking into account new demographic data from Porto Alegre and high resolution satellite images.

Demographic data showed decrease in density which affected the function, resulting in a reduction of density of the same impervious areas. These output showed that these functions needs to be updated based on the demographic changes of the communities.

**KEYWORDS:** permeable area, housing density, hard classification

## INTRODUÇÃO

As inundações urbanas são ampliadas devido à impermeabilização do solo e a canalização dos rios urbanos. A impermeabilização da superfície urbana altera o ciclo hidrológico natural com aumento do escoamento superficial, redução da evapotranspiração e a recarga dos aquíferos. A impermeabilização do solo aumenta com a população e sua densificação (Tucci,

2007) na medida em que são criadas ruas, calçadas, telhados, entre outros.

O risco da inundação é determinado pela ocorrência de precipitações com uma determinada frequência e duração na bacia. Para transformar a precipitação em nível e vazão (hidrograma) numa seção da macrodrenagem são utilizados modelos ditos “precipitação – vazão”. A parametrização da urbanização no modelo

é realizada pela área impermeável e pelos parâmetros de transporte do escoamento. A área impermeável é o parâmetro mais importante porque define a repartição entre o volume superficial e subterrâneo. Quanto maior o escoamento superficial, maiores são as vazões de cheia da bacia. Uma cidade com grande área impermeável deverá ter um maior volume de escoamento superficial e vazão máxima, o que implica em altos custos em obras de drenagem urbana e potenciais impactos sobre a população e infraestrutura.

### Uso do Solo e escoamento na bacia urbana

Para planejar e mitigar os impactos da alteração do uso do solo sobre o escoamento na drenagem urbana é necessário prever no futuro as áreas impermeáveis numa bacia hidrográfica urbana com base no planejamento urbano da cidade. No Plano Diretor Urbano das cidades a ocupação é definida por densidade de ocupação da população. Portanto, torna-se necessário desenvolver uma relação que permita relacionar estas duas variáveis de planejamento urbano e de drenagem urbana.

A previsão de densidade habitacional pode ser feita a partir das diretrizes estabelecidas em um Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano (PDDU). Com a relação entre densidade habitacional e área impermeável é possível estimar em macrobacias urbanas as áreas impermeáveis em função da tendência futura da expansão urbana. Assim, com estas informações é possível internalizar no Planejamento Urbano o risco de inundação devido à drenagem urbana.

### Estimativas da relação entre densidade habitacional e área impermeável

Stankowski (1972) desenvolveu uma relação entre densidade habitacional e área impermeável com base em 21 cidades de New Jersey (EUA). O autor apresentou diversos tipos de curvas baseadas nas características do uso do solo tais como: residencial, comercial e industrial avaliando as modificações de áreas urbanas e suburbanas pelo adensamento populacional e sua importância para o planejamento e estudos hidrológicos. Gluck e McCuen (1975) usaram outros parâmetros além da densidade populacional, como densidade de moradias e a distância ao centro comercial visando refinar o estudo para a cidade de Washington. Huber e Dickinson (1992) apresentam uma coletânea das equações de regressão obtidas de estudos de outros autores, sugerindo a proposta por Stankowsky (1972) que ampliou o estudo para 567 ci-

dades de New Jersey. Ridd (1995) propôs um modelo denominado V-I-S (Vegetação - Impermeável - Solo) por meio de projeto piloto com 770 pontos da área urbana de Salt Lake City, (EUA), representando a composição de cobertura urbana. Este modelo apesar de trazer mais informações exige também mais dados para a sua estimativa, o que limita a sua aplicação.

Motta e Tucci (1984) utilizaram ortofotos de bacias de Porto Alegre e determinaram a relação para a bacia do Arroio Diluvio para 1970. Posteriormente Tucci et. al. (1989) desenvolveram o mesmo estudo para onze bacias urbanas na região Metropolitana de São Paulo, mas estimaram as áreas impermeáveis pelo ajuste da área impermeável num modelo hidrológico com base em registros hidrológicos. Tais estudos foram realizados para grandes bacias urbanas, com características variáveis de topografia. Campana e Tucci (1994) consolidaram os estudos anteriores utilizando imagens LANDSAT das cidades de Porto Alegre, São Paulo e Curitiba. Os dados foram verificados com base em amostras medidas em ortofotos. Neste estudo as áreas inferiores a 2 km<sup>2</sup> mostravam erros maiores devido a distorções de ocupações.

As limitações destas relações são: (a) áreas predominantemente comerciais e industriais não mostram a mesma tendência; (b) a topografia pode alterar a ocupação devido a dificuldade de ocupação (grande declividade do terreno). Isto ocorre em grandes relevos; (c) áreas pequenas podem estar distorcidas por misto de edifícios com áreas verdes.

### Variação no tempo da relação

As relações entre área impermeável e densidade habitacional podem mudar ao longo do tempo, devido às seguintes causas: (a) alteração do número de pessoas por unidade habitacional; (b) alteração do padrão de impermeabilização dos espaços novos devido a remodelação das cidades; (c) aprimoramento das imagens, e métodos de estimativa de áreas impermeáveis.

Este artigo utiliza dados da cidade de Porto Alegre para avaliar a alteração da relação área impermeável x densidade habitacional com relação ao estudo de Campana e Tucci (1994). Foram utilizados: imagem de satélite de alta resolução e dados censitários recentes.

### FATORES QUE INFLUENCIAM A RELAÇÃO ENTRE DENSIDADE E ÁREA IMPERMEÁVEL

A seguir são analisados os fatores que influenciam a relação entre densidade habitacional e área imper-

meável iniciando pela densidade habitacional que é um fator socioeconômico.

### Densidade habitacional

A densidade urbana pode ser representada pela seguinte equação

$$D_d = 10.000 k_1.k_2.p/Am \quad (1)$$

onde  $D_d$  é a densidade em habitantes/ha;  $k_1$  é a proporção de áreas privadas com relação a áreas públicas (entre 0 e 1);  $p$  é o número de pessoas por domicílios;  $k_2$  é o número médio de unidades residenciais por lote; e  $Am$  é a área média dos lotes em  $m^2$ .

Os parâmetros podem variar de acordo com o seguinte:

- ☞ A proporção da área pública em relação a área total,  $k_1$  varia de 0,25 a 0,35, em face da regulação existente no Brasil, excetuando as áreas irregulares. O limite superior é o mais frequente;
- ☞ A frequência maior do tamanho dos lotes é de 300 e 500  $m^2$  para a classe média das cidades brasileiras, podendo variar abaixo e acima deste limite, principalmente de acordo com a renda em algumas cidades como Brasília;
- ☞ O valor de  $p$  varia com o tempo em função da queda de natalidade no Brasil. O valor médio brasileiro variou de 4,19 para 3,3 nos últimos 20 anos (Tabela 1). Segundo a Sinopse do Censo Demográfico 2010 (IBGE, 2011), têm-se os

valores de 3,1 e 3,2 para as Regiões Sul e Sudeste respectivamente, sendo que para as Regiões Norte e Nordeste os valores são 4,0 e 3,5.

A taxa de fecundidade, que nos anos 50 estava em 6,21 filhos por casal, declinou para o valor de 2,4 filhos por mulher em 2000 (IBGE, 2004). Neste mesmo censo  $p=3,73$  em 2000. Em 2010 o valor de  $p$  é de 3,30 e a taxa de fecundidade é inferior a 2,1 filhos por casal que representa a taxa de equilíbrio de reposição da população.

Segundo Porto (2011) a região Metropolitana de São está reduzindo sua densidade devido a este processo como pode ser observado na figura 1. Este resultado mostra que a redução da densidade está provavelmente ligada à redução da taxa de natalidade e famílias menores.

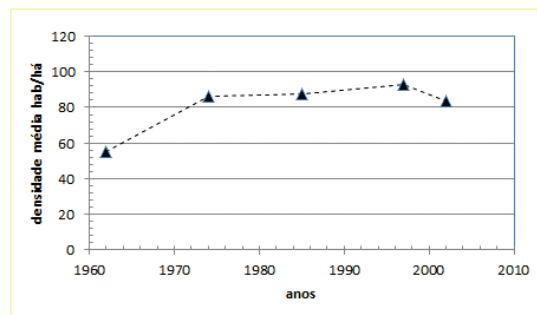
### Área impermeável

A área impermeável é uma variável que depende da infraestrutura urbana e da ocupação do solo pela população. Este é um processo com uma dinâmica de alteração mais lenta que a densidade para ter reflexo numa área muito grande. No entanto, na medida em que áreas das cidades se valorizam é natural observar-se verticalização e exploração maior dos espaços públicos. No entanto, estas condições ficam refletidas pelas amostras de ambientes semelhantes já observados no passado. Portanto, numa cidade onde existiam áreas com grande variação densidade e áreas bem densificadas este efeito na relação não deverá ser significativo. Não existiam dados para avaliar este aspecto neste artigo.

**TABELA 1 – FATOR P, MÉDIA DE PESSOAS POR UNIDADE DOMICILIAR (HAB/DOMICÍLIO)**

Unidade Geográfica	Censo 1991	Censo 2000	Censo 2010
Brasil	4,19	3,73	3,30
Região Sul	3,85	3,43	3,10
Rio Grande do Sul	3,64	3,30	2,97
Porto Alegre	3,49	3,01	2,81*

Fonte: IBGE – SIDRA. \*valor calculado pela razão entre a população residente total e domicílios permanentes.



**FIGURA 1. Variação da densidade de ocupação da Região metropolitana de São Paulo ao longo das últimas décadas (Porto, 2011).**

## Função

A função pode ser expressa por

$$A_i = F(D_d) = F[10.000 k_1 \cdot k_2 \cdot p / A_m] \quad (2)$$

onde  $A_i$  é a área impermeável em %. Esta relação pode se alterar devido ao seguinte:

- ☒ Alterações na urbanização pública ou privada, por mudança das áreas impermeáveis. Na medida em que a cidade se densifica no Brasil observa-se a perda de espaço das áreas verdes tanto dentro das áreas públicas como privadas;
- ☒ Mudança de  $p$  devido a questões demográficas (tabela 1). A redução do crescimento demográfico pelo número de filhos por casal se reflete no número de pessoas em cada unidade habitacional;
- ☒ Mudanças de  $k_1$ ,  $k_2$  e  $A_m$  estes fatores são mais estáveis ao longo do tempo. Somente se alteram com reformas urbanas.

A tendência atual deste processo é redução da densidade habitacional e aumento da área impermeável, fazendo com que o aumento da população ocupe áreas maiores e aumente a quantidade  $m^2$  de área impermeável por habitante.

## ATUALIZAÇÃO DA RELAÇÃO ÁREA IMPERMEÁVEL E DENSIDADE HABITACIONAL EM PORTO ALEGRE

### Densidade habitacional

As áreas estudadas foram 12 bairros da cidade de Porto Alegre. Estes bairros possuem características amostrais distintas com relação à topografia e ocupação descritas na tabela 2. Os dados demográficos foram obtidos da base de dados SIDRA do IBGE (IBGE, 2000) onde existem informações sobre contagem demográfica, por Estados, cidades, municípios e bairros brasileiros do último censo demográfico no ano de 2000. Os dados dos bairros foram obtidos em (PMPA, 2010).

### Metodologia de Estimativa da área impermeável

Para estimativa da área impermeável nos bairros foi utilizada a classificação de imagens multiespectrais. Esta classificação consiste na identificação de diferentes alvos na superfície terrestre através do comportamento espectral dos mesmos. Este processo pode partir do próprio usuário na identificação visual e no agrupamento de tais alvos em classes sendo denominada de classificação supervisionada.

A classificação supervisionada pode ainda ser subdividida em rígida ou relativa. Quanto à primeira classificação o método da máxima verossimilhança é um dos mais utilizados. Este método se baseia na teoria de Bayes. Conhecendo as informações do conjunto de amostras de treinamento de cada classe, este comando associa através da média, da variância e covariância das assinaturas espectrais, a possibilidade de um pixel pertencer a uma determinada certa classe (Clark Labs, 2006). Nesta classificação são geradas imagens representando a probabilidade dos pixels existentes na imagem pertencerem a cada classe, num intervalo de 0 a 1.

Utilizou-se o produto gerado de um mosaico de imagens do satélite QuickBird II, imagem fusionada (pancromática mais as bandas do visível) com resolução espacial de 1m., obtidas no período de março de 2002 a março de 2003. Para a classificação das imagens, utilizou-se o software IDRISI, e optou-se pela classificação supervisionada rígida. Com os bairros escolhidos gerou-se então para cada bairro uma máscara para classificação individual.

Para verificação da classificação utilizou-se uma imagem de controle (100m x 100m) referente a uma área pertencente a um dos bairros de estudo com características de áreas impermeáveis e permeáveis comuns aos outros bairros de estudo. A imagem de controle foi classificada visualmente definindo-se duas classes principais, uma permeável englobando sub-classes como vegetação e solo exposto e outra classe impermeável composta pelas sub-classes: asfalto, cobertura cerâmica, cobertura concreto, cobertura

**Tabela 2**  
DENSIDADE E CARACTERÍSTICAS  
PARA O CENSO DE 2000

Bairro	Dh (Hab/Ha)	Ocupação
Bom Fim	298,71	Residencial
Cidade Baixa	210,56	Residencial
Centro	153,10	Resid./Com.
Santana	142,42	Residencial
Menino Deus	137,57	Residencial
Floresta	89,47	Com./Ind./Serv.
Hípica	23,18	Resid./Rural
Guarujá	20,55	Resid./Rural
Serraria	16,79	Resid./Rural
Chapéu Do Sol	5,24	Resid./Rural
Ponta Grossa	3,53	Resid./Rural
Lageado	1,26	Resid./Rural

metálica e água. Após essa etapa, realizou-se a classificação automática para os bairros em estudo por Máxima (Menezes Filho, 2012).

A metodologia utilizada teve imagens e procedimentos diferentes ao desenvolvido para estimar a curva anterior por Campana e Tucci (1994), mas obtiveram-se desvios semelhantes na verificação entre os valores estimados e amostrados.

### Resultados das áreas impermeáveis

Os valores obtidos de área impermeável e densidade habitacional são apresentados na tabela 3. Com base nos dados da tabela 3 foi produzida a figura 2, incluindo a curva de Campana e Tucci (1994). O ajuste da curva aos pontos foi obtido com  $R^2=0,96$ .

Observa-se que a curva com os dados recentes se deslocou para cima com relação a curva com dados da década de 90. Pode-se observar que:

- (a) A curva anterior nascia na origem, ou seja, densidade e área impermeável nula. Foi obtido anteriormente um ajuste por

$$A_i = 0,49 D_d \text{ Campana e Tucci (1994)} \quad (3)$$

Para densidade inferior a 120 hab/ha.

- (b) Com os novos valores a reta fica aproximadamente

$$A_i = 0,57 D_d + 13 \quad (4)$$

**TABELA 3 – VALORES DE ÁREA IMPERMEÁVEL NOS BAIRROS OBTIDOS PELA CLASSIFICAÇÃO DE IMAGEM**

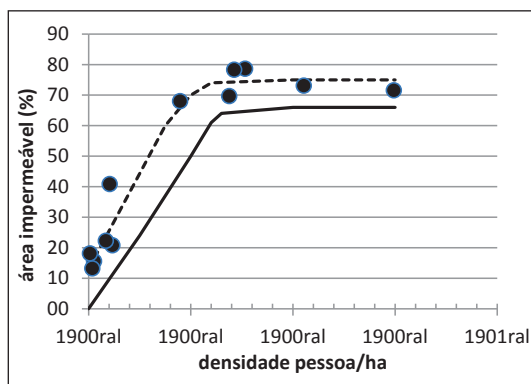
Bairro	DH (hab/ha)	AI (%)
Bom Fim	298,71	71,58
Cidade Baixa	210,56	73,12
Centro	153,10	78,66
Santana	142,42	78,33
Menino Deus	137,57	69,70
Floresta	89,47	68,04
Hípica	23,18	20,82
Guarujá	20,55	40,88
Serraria	16,79	22,29
Chapéu do Sol	5,24	15,60
Ponta Grossa	3,53	13,25
Lageado	1,26	18,15

Para densidade até 100 hab/ha.

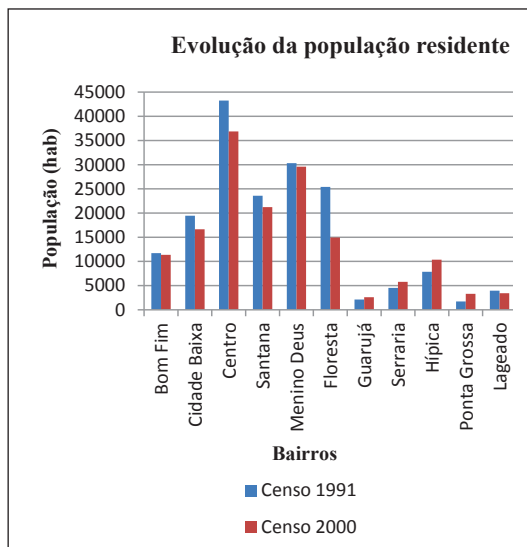
Onde  $D_d$  é a densidade de drenagem e  $A_i$  é a área impermeável em %.

Pode-se observar que a inclinação da reta se alterou aumentando a área impermeável para a mesma densidade.

Na figura 3 é apresentada a alteração da população entre dois censos. Esta figura mostra a redução de



**FIGURA 2. Relações de áreas impermeáveis e densidade habitacional.**



**FIGURA 3. Evolução da população residente em bairros de Porto Alegre.**

densidade nos bairros na década para os bairros mais antigos e com ocupação consolidado como Bom Fim, Centro e Santana. O crescimento verificado foi para bairros periféricos distantes do núcleo central dentre eles: Guarujá, Serraria e Hípica com ocupação residencial/rural, refletindo o crescimento populacional.

Para uma área consolidada a redução da densidade se reflete na tendência observada na figura 2, onde uma mesma área impermeável possui menor densidade.

Analisando os pontos da curva e sua parte superior verifica-se que o Centro da cidade tem uma área impermeável próxima de 80%, mas com densidade menor devido ao efeito de ser uma área com proporção comercial maior. No caso do Bom Fim a concentração da população é alta, mas existem espaços verdes importantes. A curva média passa entre estes pontos e tende assíntota para 75%.

## CONCLUSÕES

Neste estudo foi atualizada a relação entre a área impermeável e a densidade habitacional para a cidade de Porto Alegre utilizando-se de imagem de alta resolução e a amostra de 12 bairros da cidade.

A relação citada tem sido utilizada para o prognóstico das áreas impermeáveis de uma bacia hidrográfica para o Plano Diretor de Drenagem Urbana. A densidade habitacional é definida no Plano Diretor Urbano da cidade. A área impermeável é assim estimada para o futuro com base nesta relação. Esta relação é considerada fixa no tempo, no entanto este estudo mostrou que a mesma se altera devido à mudança principalmente da densidade habitacional das áreas consolidadas.

As potenciais causas de mudança são: (a) alteração do número de pessoas por unidade habitacional; (b) aumento da área impermeável com a densificação; (c) diferença de avaliação devido às imagens e amostragens.

A principal causa desta mudança foi a redução do número de pessoas por unidade habitacional em função do perfil demográfico brasileiro das últimas duas décadas, reduzindo a densidade habitacional para a

mesma área. Esta situação foi observada também em outras cidades.

Porto (2011) mostrou que a densidade média da Região Metropolitana de São Paulo até 1997 foi crescente chegando a 97 hab/ha, mas em 2002, depois de cinco anos caiu para 84 hab/ha devido ao maior aumento da área urbana em relação a população (figura 1).

Este processo ocorre pela redução da fertilidade, redução do tamanho das famílias, melhoria econômica dos últimos anos que expandiu a área ocupada com menor população.

A relação entre área impermeável e densidade habitacional mudou também devido a maior impermeabilização das áreas já que a assíntota da curva agora ocorre para 75% de áreas impermeáveis em comparação a 67% como obtido anteriormente com imagens de 1990.

Estes resultados têm implicações não somente na drenagem urbana, mas em:

- Abastecimento de água, pela redução do consumo de água e geração de esgoto para a mesma infraestrutura já que o consumo. Isto produz perda de receita e recuperação de custo das empresas de Água e Esgoto;
- Resíduos Sólidos deve ter também uma redução de contribuintes apesar do número de domicílios continuar o mesmo;
- No planejamento urbano dos espaços existe a tendência de que cada pessoa utilize mais área impermeável para sua habitação, menor número de pessoas deveria reduzir a demanda por tráfego, mas atualmente isto é suplantado pelo aumento de renda e aumento de veículos.
- Em drenagem urbana, em 1990, com base na relação da época obtida por Tucci e Campana (1994) estimava-se que cada pessoa utilizava 50 m<sup>2</sup> de área impermeável (densidade de 50 hab/ha), este valor aumentou para 90 m<sup>2</sup>.

O desafio atual é estabelecer formas de atualizar estas curvas com previsão de dinâmica populacional na projeção de infraestrutura de água nas cidades.

## Referências

CAMPANA, N.A.; TUCCI, C.E.M. (1994). Estimativa de área impermeável de macro-bacias urbanas. RBE, Caderno de Recursos Hídricos. Vol.2, n.2.



- CLARK LABS (2006). IDRISI Andes – Guide to Gis and Image Processing. Clark University: Worcester, MA. USA.
- GLUCK, W. R; McCUEN, RH. Estimating land use characteristics for hydrologic models. Water Resources Research, v. 1. n. 1, 1975.
- HUBER, W. C; DICKINSON, R. E. (1992). Storm Water Management Model, Version 4: User's Manual. U.S. Environmental Protection Agency, Athens,USA.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. SIDRA. Sistema IBGE de Recuperação Automática. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/>. Acesso em: 18 fev.2011
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Estudos e Pesquisas. Informação Demográfica Sócioeconômica, número 13. Tendências Demográficas. Uma análise dos resultados da amostra do Censo Demográfico 2000. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/>. Acesso em: 08 nov.2011
- MOTTA, J.C; TUCCI, C.E.M. (1984). Simulation of the urbanization effect in flow. Hydrological Sciences Journal, 29, 2, junho.
- MENEZES FILHO, F. C. M. 2012. Estimativa das áreas impermeáveis de bairros de Porto Alegre-RS como etapa ao planejamento urbano. Artigo submetido à Revista Ambiente e Água – An Interdisciplinary Journal of Applied Science.
- PMPA, 2010. Prefeitura Municipal de Porto Alegre. Observatório da cidade de Porto Alegre. Disponível em: <http://www2.portoalegre.rs.gov.br/observatorio/>. Acesso em:18 fev. 2011.
- PORTO, M.A., 2011. São Paulo, Brazil Urban Water. Escola Politécnica Universidade de São Paulo. Apresentação.
- RIDD, M.K. Exploring a V-I-S (Vegetation-impervious surface-soil) model for urban ecosystem analysis through remote sensing: comparative anatomy for cities. International Journal of Remote Sensing. 1995, v. 16. n. 12, p.2165-2185.
- STANKOWSKI, S. J. Population density as an indirect indicator of urban suburban land-surface modifications. Geological Survey Professional Paper, 800-B, p.B219-B224. 1972.
- TUCCI, C.E.M, BRAGA Jr.,B.P.F; SILVEIRA, A.(1989). Avaliação do impacto da urbanização nas cheias urbanas. RBE, Caderno de Recursos Hídricos. Vol.7, n.1.
- TUCCI, C.E.M. (2007). Inundações Urbanas. ABRH/RHAMA. Coleção ABRH, v.11. 393p. Porto Alegre, RS.

**Frederico Carlos Martins de Menezes Filho** Instituto de Pesquisas Hidráulicas  
- UFRGS. E-mail: [menezesfilho.frederico@gmail.com](mailto:menezesfilho.frederico@gmail.com)

**Carlos Eduardo Morelli Tucci** Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS e  
Universidade Feevale. E-mail: [tucci@rhama.net](mailto:tucci@rhama.net)