

**Universidade Federal de Santa Catarina
Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental**

**ESTIMATIVA ESPACIAL DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO POR
MEIO DE CORRELAÇÃO COM ÍNDICE DE VEGETAÇÃO
NORMALIZADO**

Lia Mara Lazarote

**FLORIANÓPOLIS (SC)
NOVEMBRO, 2007.**

**Universidade Federal de Santa Catarina
Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental**

**ESTIMATIVA ESPACIAL DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO POR
MEIO DE CORRELAÇÃO COM ÍNDICE DE VEGETAÇÃO
NORMALIZADO**

Lia Mara Lazarote

**Trabalho apresentado à Universidade
Federal de Santa Catarina para Conclusão
do Curso de Graduação em Engenharia
Sanitária e Ambiental**

**Orientador
Prof. Dra. Cláudia Weber Corseuil**

**FLORIANÓPOLIS, (SC)
NOVEMBRO/2007**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**

**ESTIMATIVA ESPACIAL DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO POR
MEIO DE CORRELAÇÃO COM ÍNDICE DE VEGETAÇÃO
NORMALIZADO**

LIA MARA LAZAROTE

**Trabalho submetido à Banca Examinadora como parte dos requisitos
para Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e
Ambiental – TCC II**

Prof. Dr. Cláudia Weber Corseuil
(Orientadora)

Doutorando Roberto Valmir da Silva
(Membro da Banca)

Prof. Dr. Pérciles Alves Medeiros
(Membro da Banca)

**FLORIANÓPOLIS, (SC)
NOVEMBRO/2007**

*Este trabalho é dedicado ao meu amado pai,
Jurandir Lazarote (in memoriam)*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado força e guiado os meus passos ao longo desses anos árduos de estudo;

À minha mãe Cynira, pelas orações, pelo amor e exemplo de vida;

À minha irmã Magda, por ser também para mim como uma mãe e a quem sempre pude recorrer nos momentos mais difíceis da minha vida;

Aos meus irmãos Magali e Leandro, dos quais senti saudades nos intervalos entre meus retornos para casa;

Ao meu cunhado Aguinaldo, que me viu crescer, sempre me ajudou como um pai e a quem devo respeito e muito estima;

À minha sogra Hélia, pelas orações, envios de boas vibrações e mensagens carinhosas de incentivo;

Aos meus familiares, em especial aos meus sobrinhos William, Laura e Marilyn (*in memoriam*);

Aos meus amigos presentes ou distantes, que estão sempre em meus pensamentos e no meu coração.

Aos novos amigos conquistados durante a universidade, pela companhia, boas gargalhadas, festas e aflições compartilhadas;

E ao meu amado companheiro Clodoaldo, pela dedicação ao nosso amor durante todos esses anos e por ser meu porto seguro.

Minha sincera gratidão também:

À Prof.^a Cláudia Corseuil, pela atenção, estímulos, ensinamentos, paciência e amizade;

Ao Roberto Silva, pelo auxílio e pela “idéia” da proposta do estudo e ao Prof.^o Péricles A. Medeiros, pelas sugestões e críticas;

À Joana e Camila, pela ajuda na manipulação das ferramentas do Idrisi e Word.

Ao pessoal do Laboratório de Hidrologia - LABHIDRO, em especial ao prof. Masato Kobiyama, por permitir a minha “invasão” ao laboratório;

Ao Gilberto e ao Valtair do IPUF, por ter me atendido com paciência durante as inúmeras visitas em busca dos dados cartográficos e material fotográfico.

E ao casal Dalmaso, meus amigos, pelo “help” de última hora.

RESUMO

As inundações em várias cidades do Brasil e do mundo vêm sendo frequentemente noticiadas pela mídia nos últimos anos. Em Florianópolis, uma das regiões comumente atingidas é a microbacia do Itacorubi, localizada no centro-oeste da Ilha de Santa Catarina. Atualmente, muitos modelos hidrológicos são criados com o intuito de se fazer a previsão de enchentes e inundações em bacias hidrográficas. A utilização de modelos hidrológicos distribuídos permite calcular unidades espaciais bastantes reduzidas, permitindo captar a variabilidade espacial natural da bacia, em termos de suas características físicas (Gomes e Rodrigues, 1998). Neste contexto, a vegetação exerce uma importante função na bacia hidrográfica por contribuir para o balanço hídrico da região por meio da interceptação de chuvas e da evapotranspiração. A taxa de evapotranspiração varia de espécie, estágio e vigor de crescimento das plantas. O objetivo principal deste estudo foi gerar um mapa de Evapotranspiração Potencial (ETP) distribuída, por meio da correlação entre os valores de ETP instantânea, obtidos da estação meteorológica da UFSC, e as imagens NDVI geradas a partir do sensor CCD/CBERS-2. A metodologia utilizada consistiu na determinação do índice de vegetação normalizado por meio da razão entre as bandas do vermelho e do infravermelho próximo, seguida da correlação com a ETP instantânea, obtida na estação meteorológica do campus da UFSC, e a geração do mapa de ETP distribuída para toda microbacia de estudo. Os resultados obtidos foram a imagem NDVI, a correlação entre ETP e NDVI e o mapa de ETP distribuída. Os valores de NDVI variaram de 0 a 0,72. Com isso foi possível verificar que 52% da área da bacia possui o NDVI acima de 0,51, indicando a grande quantidade de vegetação presente na área de estudo. Por meio da imagem de ETP distribuída, foi possível verificar que as áreas onde há predomínio da vegetação ocorreram os valores mais altos de ETP, com valores de 0,23 a 0,30 mm.h⁻¹. Com isso, concluiu-se que o uso de imagens do sensor CCD/CBERS2 gerou resultados satisfatórios para a produção de imagem NDVI, de acordo com o objetivo geral do estudo. Foi possível verificar a correlação entre os dados de ETP instantânea e a imagem NDVI da microbacia, e por meio do mapa da ETP distribuída em relação ao NDVI foi possível verificar valores com boa precisão de ETP nos diferentes pontos da microbacia e sucessivamente a maior contribuição da ETP nas regiões com maior densidade vegetativa.

Palavras-chave: índice de vegetação; sistema de informação geográfica; sensoriamento remoto; evapotranspiração.

ABSTRACT

The inundations in various cities of Brazil and the world have frequently been reported by the media in the last years. In Florianopolis, one of the commonly affected regions is the micro-watershed of Itacorubi, located on the midwest of the island of Santa Catarina. Nowadays, many hydrological models are created with intent of predicting floods and inundations in hydrographic watersheds. The utilization of distributed hydrological models permits calculating much reduced spatial units, allowing to detect the natural spatial variability of the watershed, in terms of its physical characteristics (Gomes and Rodrigues, 1998). In this context vegetation exerts an important function in the hydrographic watershed by contributing to the region's hydric balance through the interception of rains and the evapotranspiration. The rate of evapotranspiration varies from species, stage and growth vigor of plants. The main objective of this study was generating a map of Potential Evapotranspiration (ETP) distributed through correlation between the instantaneous ETP values, obtained from UFSC's meteorological station, and the NDVI images generated via the CCD/CBERS-2 sensor. The methodology used consisted in the determination of the normalized vegetation index through the division of red and near infrared bands, followed by the correlation between instantaneous ETP, obtained in UFSC campus' meteorological station, and the generation of the map of distributed ETP around the studied micro-watershed. The obtained results were the NDVI image, the correlation between ETP and NDVI and the map of distributed ETP. The NDVI values varied from 0 to 0,72. With that it was possible to verify that 52% of the watershed area has the NDVI above 0,51, indicating the great quantity of vegetation present in the area of study. Through distributed ETP image, it was possible to verify that the areas where there is predominance of vegetation occurred the highest values of ETP, with values from 0,23 to 0,30 mm.h⁻¹. With that, it was concluded that the use of sensor CCD/CBERS2's images generated satisfactory results for the production of NDVI image, in accordance to the general objective of the study. It was possible to ascertain the correlation between the instantaneous ETP data and NDVI image of the micro-watershed, and through the distributed ETP map in relation to the NDVI it was possible to verify values of ETP with good precision in different points of the micro-watershed and successively the greater contribution of ETP in regions with higher vegetative density.

Keywords: index of vegetation; geographic information system; remote sensing. evapotranspiration.

SUMÁRIO

| | |
|--|------|
| LISTA DE FIGURAS..... | viii |
| LISTA DE TABELAS..... | ix |
| LISTAS DE SIGLAS E ABREVIATURAS..... | x |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 11 |
| 2. JUSTIFICATIVA..... | 12 |
| 3. OBJETIVOS..... | 12 |
| 3.1. Objetivos gerais..... | 12 |
| 3.2. Objetivos específicos..... | 12 |
| 4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 12 |
| 4.1. Sensoriamento Remoto..... | 12 |
| 4.2. Sistema de Informação Geográfica..... | 13 |
| 4.3. Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto..... | 14 |
| 4.4. Imagens CBERS..... | 16 |
| 4.5. Comportamento Espectral da Vegetação..... | 17 |
| 4.6. Índices de Vegetação..... | 19 |
| 4.7. Evapotranspiração..... | 22 |
| 4.8. Estudos relacionados aos NDVI e a estimativa de ETP..... | 27 |
| 5. MATERIAIS E MÉTODOS..... | 28 |
| 5.1. Fluxograma do trabalho..... | 28 |
| 5.2. Caracterização da área de estudo - A microbacia do Itacorubi..... | 29 |
| 5.3. Histórico da microbacia..... | 31 |
| 5.4. Materiais utilizados..... | 31 |
| 5.3.1 Correção Geométrica e Registro das Imagens CBERS/CCD..... | 32 |
| 5.3.2 Geração de imagem NDVI..... | 33 |
| 6. RESULTADOS..... | 34 |
| 6.1. Correção Geométrica e registro das Imagens CBERS/CCD..... | 34 |
| 6.2. Imagem NDVI..... | 34 |
| 6.3. Correlação entre os dados de NDVI e ETP..... | 36 |
| 6.4. Imagem de ETP Distribuída..... | 38 |
| 7. CONCLUSÃO..... | 41 |
| 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 42 |
| 9. ANEXOS..... | 45 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 Espectro de reflectância de uma folha de vegetação verde e sadia. | 18 |
| Figura 2: Fluxograma do trabalho | 28 |
| Figura 3: Localização da microbacia do Itacorubi – Florianópolis (SC)..... | 29 |
| Figura 4: Imagem CBERS-2/CCD, de 22/07/2006, em composição RGB-234 com o limite da Microbacia do Itacorubi – Florianópolis (SC)..... | 30 |
| Figura 5 Imagem NDVI da microbacia do Itacorubi..... | 35 |
| Figura 6 Histograma da imagem NDVI..... | 36 |
| Figura 7 Regressão Linear entre valores de NDVI e o ETP instantânea..... | 37 |
| Figura 8: ETP distribuída da microbacia do Itacorubi..... | 38 |
| Figura 9: Histograma do Mapa de ETP distribuída..... | 39 |
| Figura 10: Detalhe da localização da Estação Meterológica da UFSC | 40 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Característica do sensor CCD do satélite CBERS | 16 |
| Tabela 2: Característica do sensor IR-MSS do satélite CBERS | 16 |
| Tabela 3: Característica do sensor WFI do satélite CBERS | 17 |

LISTAS DE SIGLAS E ABREVIATURAS

APP – Área de Preservação Permanente;
APL – Área de Preservação com Uso Limitado;
AVHRR – *Advanced Very High Resolution Radiometer*;
BA – Estado da Bahia;
CBERS – Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres (*China-Brazil Earth Resources Satellite*);
CCD – *Charge-Coupled Device Sensor*;
DVI – índice de vegetação pela diferença (*Difference Vegetation Index*);
NDVI – Índice de vegetação da diferença normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index*);
ETP – Evapotranspiração Potencial;
ETR – Evapotranspiração real;
GVI – índice de vegetação verde (*Green Vegetation Index*);
GABS - Índice verde sobre solo nu (*Greenness Above Bare Soil*);
IBAMA - Instituto Brasileiro de Meio Ambiente;
IFOV – Campo Instantâneo de Visada;
IPUF - Instituto de Planejamento Urbano de Florianópolis;
INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
IR-MSS – *Infrared Multispectral Scanner Subsystem*;
IVP – Infravermelho próximo;
IVM – infravermelho médio;
IVOC – Infravermelho de onda curta;
IVT – Infravermelho termal;
LANDSAT – *Land Remote Sensing Satellite*,
LABHIDRO – Laboratório de Hidrologia - UFSC
NEA – Núcleo de Estudos da Água - UFSC;
NOAA – *National Oceanic and Atmospheric Administration*;
REM – Radiação Eletromagnética;
RMS - Erro médio quadrático (*Root Mean Square*);
RVI – Índice de vegetação pela razão (*Ratio Vegetation Index*);
SAD/69 – *South American Datum -1969*
SBI - Índice de brilho de solo (*Soil Brightness Index*);
SC – Estado de Santa Catarina;
SEBAL – *Surface Energy Balance Algorithm for Land*;
SIG – Sistema de Informação Geográficas;
SPOT – *Satellite pour l'Observation de la Terre* ;
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina;
UTM - Sistema Universal Transverso de Mercator (*Universal Transverse Mercator*);
V – Vermelho espectral;
WFI - *Wide Field Imager*;

1. INTRODUÇÃO

As inundações em várias cidades do Brasil e do mundo vêm sendo frequentemente noticiadas pela mídia nos últimos anos.

Em Florianópolis, no estado de Santa Catarina, umas das regiões frequentemente atingidas por inundações é a microbacia do rio Itacorubi, localizada no centro-oeste da Ilha de Santa Catarina.

Para Mendes et al. (2004), as inundações são decorrentes dos processos históricos de expansão urbana da região, o que gera a crescente impermeabilização do solo, ocupação de fundos de vale e invasão das áreas de preservação permanente (APP), próximas às nascentes dos rios e córregos e encostas de morro.

Atualmente a microbacia do Itacorubi encontra-se intensamente ocupada, a vegetação nativa vem sendo removida para dar lugar a novas habitações em decorrência da valorização imobiliária da região.

Os principais impactos causados por inundações são as perdas materiais e humanas, interrupção de atividade econômica e social nas áreas inundadas, contaminação por doenças de veiculação hídrica (leptospirose e cólera, por exemplo) e a contaminação da água (Mendes et al. 2004).

Atualmente, muitos modelos hidrológicos são criados com o intuito de se fazer a previsão de enchentes e inundações em bacias hidrográficas.

A utilização de modelos hidrológicos distribuídos permite calcular unidades espaciais bastantes reduzidas, captando as características físicas e a variabilidade espacial da bacia. Para esses modelos distribuídos são utilizados dados de temperatura, precipitação e evapotranspiração diárias, entre outros.

A evapotranspiração é a perda de água por evaporação do solo e transpiração da planta, sendo um parâmetro importante para o balanço hídrico de uma bacia como um todo.

Neste contexto, a vegetação exerce uma importante função na bacia hidrográfica, pois contribui para o balanço hídrico da região, por meio da interceptação da precipitação e da evapotranspiração. Sendo que a taxa de evapotranspiração varia de acordo com a espécie, o estágio de desenvolvimento e com o vigor de crescimento das plantas.

Com base nisso, técnicas de sensoriamento remoto têm sido desenvolvidas para relacionar dados de vegetação, obtidas por imagens de satélite, com a evapotranspiração determinada por métodos convencionais.

Dentre essas técnicas, tem-se o realce de imagens por meio da razão de bandas, as quais têm como objetivo principal maximizar as informações de vegetação, denominadas de índice de vegetação (NDVI).

Diversos métodos foram desenvolvidos para o cálculo da evapotranspiração potencial utilizando imagens NDVI, dentre eles cita-se o método SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*) que tem por objetivo a obtenção da evapotranspiração (ET) por meio de dados de imagem digital e dados de superfície (MENEZES ET AL. 2007).

Com os dados de evapotranspiração correlacionados com o NDVI, obtido de imagens de satélite, pretende-se gerar um mapa de ETP distribuída, contribuindo assim para o conhecimento dessa variável hidrológica e o uso do mapa em modelos hidrológicos distribuídos.

2. JUSTIFICATIVA

O presente trabalho se justifica pelo fato de que a perda de água por evaporação e por transpiração das plantas é de grande importância para o balanço hídrico de uma região e podendo ser utilizada, por exemplo, para se estimar as necessidades hídricas dos cultivos agrícolas.

Outro aspecto é que os modelos hidrológicos distribuídos necessitam de dados distribuídos, dentre eles a evapotranspiração, para a tentativa de representar os fenômenos físicos em uma bacia hidrográfica e, com isso, melhor entender o ciclo hidrológico e fazer previsões de enchentes.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivos gerais

O presente trabalho tem por objetivo estimar a distribuição espacial da evapotranspiração potencial por meio da correlação com o índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) para a microbacia do Itacorubi, situada em Florianópolis, no Estado de Santa Catarina.

3.2 Objetivos específicos

- ✓ Avaliar o potencial das imagens do sensor CCD/CBERS 2 na geração de imagens de NDVI;
- ✓ Verificar a correlação entre a evapotranspiração potencial (ETP) e o NDVI;
- ✓ Verificar a distribuição da ETP em relação ao NDVI;

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. Sensoriamento Remoto

O sensoriamento remoto é definido por Novo (1992) como sendo a utilização conjunta de modernos sensores, equipamentos para processamento e transmissão de dados, aeronaves, espaçonaves, etc., com o objetivo de estudar o ambiente terrestre por meio do registro e análise das interações entre a radiação eletromagnética e a superfície terrestre, em suas diversas manifestações.

O sensoriamento remoto pode ser visto como um sistema de aquisição de informação e é subdividido, segundo a mesma autora, em dois subsistemas: o de coleta de dados e de análise de dados.

Subsistema de coleta de dados, onde os requisitos mínimos necessários para o seu funcionamento são a existência de fonte de radiação, propagação da radiação pela atmosfera, incidência de radiação sobre a superfície terrestre e a produção de radiação que retorna ao sensor após propagar-se pela atmosfera.

Subsistema análise de dados, onde a intensidade de energia que chega ao sensor é transformada em um sinal passível de interpretação. Essa interpretação integra o

sistema de análise de dados que também incluem o processamento fotográfico e eletrônico do sinal, modelagem, entre outros.

Segundo Crosta (1992), as imagens de sensoriamento remoto servem de fontes de dados para estudos e levantamentos geológicos, ambientais, agrícolas, cartográficos, florestais, urbanos, oceanográficos, entre outros.

O mesmo autor relata que, o sensoriamento remoto teve início antes de 1925, quando se manipulava fotografias aéreas obtidas por meio de balões. As técnicas de processamento tiveram uma evolução rápida com a migração para os sistemas de computação digital, com o surgimento das imagens digitais.

Na literatura é crescente o número de trabalhos procurando associar o uso do sensoriamento remoto na análise hidrológica. Dentre eles, pode-se citar os estudos realizados por Victoria (2004), em que o objetivo principal foi estimar o balanço hídrico da bacia do Ji-Paraná - RO, por modelo hidrológico espacialmente distribuído, utilizando técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento.

A metodologia utilizada se baseou no balanço hídrico proposto por Thornthwaite-Mather e imagens do satélite do sensor *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) inseridas em um SIG.

O resultado obtido mostrou que o modelo subestimou a evapotranspiração real em 9% e superestimou o excedente hídrico em 17%.

Com isso, o mesmo autor concluiu que a estimativa da evapotranspiração potencial pelo método empírico de Thornthwaite, juntamente com o balanço hídrico de Thornthwaite-Mather dentro de um sistema do SIG mostrou-se viável, com resultados coerentes com os encontrados na literatura. Além disso, o modelo apresentou coerência espacial e temporal.

4.2. Sistema de Informação Geográfica

Um Sistema de Informação Geográfica é baseado em computador que permite capturar, modelar, manipular, recuperar, consultar, analisar e apresentar dados geograficamente referenciados (CÂMARA NETO, 1995).

Para Liu (2006), “*o sistema de informações geográficas (SIG) é um modelo matemático dinâmico construído com um banco de dados digitais gerenciados para facilitar a atualização e a aplicação dos dados georreferenciados de infinitas camadas de informação no planejamento e na otimização de uma determinada tarefa*”.

O SIG é um poderoso conjunto de ferramentas para coleta, armazenagem, recuperação e exibição de dados do mundo real para determinados propósitos (BURROUGH, 1986).

O SIG é um caso especial de sistema de informação, em que o banco de dados é formado por características, atividades ou eventos distribuídos especialmente.

Com base nas diversas definições de SIG Silva (2003), destacou os pontos em comum que possibilitaram esboçar uma definição mais completa dessa ferramenta. O SIG necessita de uma base digital integrada georreferenciada e com controle de erro e devem conter funções de análise de dados.

Na década de 1970, o aparecimento das imagens de sensoriamento remoto se tornou uma das fontes de informação mais importantes para o SIG e ao final da década de 80, as funções do SIG estavam bem estabelecidas.

No início da década de 90, houve o aumento crescente da integração do usuário com os SIGS, facilitando o uso dos aplicativos (SILVA, 2003).

Os fenômenos relacionados ao mundo real podem ser descritos, segundo Silva (2003) de três maneiras espacial, temporal e temática.

Espacial quando a variação muda de lugar para lugar (declividade, altitude, profundidade do solo); temporal quando a variação muda com o tempo (densidade demográfica, ocupação do solo) e temática quando as variações são detectadas através de mudança de características (geologia, cobertura vegetal).

Segundo Moreira (2003), um SIG apresenta duas características principais: i) permite inserir e integrar num único banco de dados, informações espaciais provenientes de diversas fontes, como imagem de satélite, cartografia, dados censitários, dados de rede e modelo digital de terreno; ii) oferece meios para combinar várias informações através de algoritmos de manipulação e análise, além de consulta, recuperação, visualização e plotagem da base de dados georreferenciados.

A utilização em larga escala desses sistemas tornou-se possível a partir da disponibilidade, a custos aceitáveis de diversas tecnologias, como a cartografia digital, os bancos de dados e o processamento digital de imagens (MOREIRA, 2003).

Vieira et al. (2006) fizeram uso do SIG para a análise Urbana da Microbacia do Rio Itacorubi, em Florianópolis-SC. No trabalho os autores utilizaram imagens do satélite *QUICKBIRD* e uso do SIG *ArcGis* 8.1 da ESRI,

A análise resultou na identificação de cinco classes de áreas, sendo: potencialmente degradadas, ocupadas irregularmente, já urbanizadas, com tendência a verticalização ou expansão em áreas de APP e APL.

Os autores perceberam a eficácia do SIG para a determinação espacial de qualquer temática abordada, em especial a gestão ambiental urbana.

4.3. Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto

O processamento digital de imagens tem como função primordial fornecer ferramentas para facilitar a identificação e a extração da informação contida nas imagens, para uma posterior interpretação, sendo que o resultado desse processo é a produção de outras imagens com informações específicas, extraídas e realçadas a partir das imagens brutas (CROSTA, 1992).

Segundo Crosta (1992), o objetivo principal do processamento de imagens é o de remover as barreiras inerentes ao sistema visual humano, facilitando a extração de informações a partir das mesmas.

Dentre os diversos métodos de operações de processamento de imagens, tais como os ópticos, fotografias e digitais, esse último, segundo o mesmo autor, é tido como o de melhor eficácia, devido à precisão e a flexibilidade dos atuais sistemas de computação.

O processamento digital de imagens de sensoriamento remoto utiliza sistemas que adquirem imagens da superfície terrestre a bordo de plataformas aéreas (aviões) ou orbitais (satélites).

As imagens de satélite quase sempre são multiespectrais, fato este que as diferencia de outras imagens digitais.

As imagens multiespectrais são obtidas de diferentes porções do espectro eletromagnético, desde a porção visível (V), infravermelho próximo (IVP), médio (IVM), de comprimento de onda curta (IVOC), até o infravermelho termal (IVT).

Com isso, é necessário o uso intensivo de técnicas de processamentos baseadas em modelos estatísticos para o tratamento das mesmas (CROSTA, 1992).

O sistema sensor capta a energia radiante e o converte num sinal elétrico, que é transformado de analógico para digital. Essa imagem ou dado digital é transmitido e codificado pelo satélite e armazenado na forma de imagens ou gráficos.

A imagem é constituída de um malha. Cada cela dessa malha tem sua localização definida em um sistema de coordenadas tipo “linha e coluna”, representados por “x” e “y”, respectivamente. A origem da malha é sempre no canto superior esquerdo e cada célula da malha recebe o nome de “pixel” (CROSTA, 1992).

Para as imagens multiespectrais a representação digital é complexa, pois, para cada coordenada (x,y), haverá um conjunto de valores de nível de cinza (Novo, 1992).

Esse nível de cinza é conhecido por Número Digital (ND) e representa a média intensidade da energia eletromagnética (refletida ou emitida) medida pelo sensor, em cada faixa ou banda espectral, para a área da superfície da Terra e seus diferentes materiais presentes, correspondente ao tamanho do pixel (CROSTA, 1992).

O pixel com ND próximo ou igual a zero indica que grande parte da REM que chegou sobre a área de abrangência dele foi absorvida.

A coloração desse pixel tenderá a ser preta. Em contraponto, um pixel com ND alto e próximo de 255 indica que a maior parte da REM foi refletida, portanto a coloração deste pixel tenderá a ser branca (CROSTA, 1992).

A resolução da imagem digital é dividida em quatro parâmetros sendo eles: espacial, de acordo com o IFOV (campo instantâneo de visada); espectral que, segundo Novo (1992), é uma medida da amplitude das faixas espectrais às quais o sensor é sensível; radiométrica, que se refere ao número de níveis de cinzas usados para expressar os dados coletados pelo sensor; e temporal, quando são usadas imagens de diversas épocas do ano.

O processamento digital de imagem é dividido, segundo o Manual do *Spring*, em três fases: pré-processamento, realce e classificação.

O Pré-processamento é o tratamento inicial dos dados brutos por meio da calibração radiométrica da imagem, correção de distorções geométricas e remoção de ruído.

O realce também é conhecido como transformação radiométrica, e tem como vantagem a possibilidade de gerar novas imagens, preservando o conteúdo de informações que não são muito visíveis nas originais. Uma outra vantagem é o número reduzidos de bandas transformadas (PONZONI, 2007; MOREIRA, 2003).

A classificação da imagem consiste em atribuir classes aos objetos presentes na mesma.

4.4. Imagens CBERS

De acordo com Moreira (2003), numa parceria do Brasil com a China, foi criado em 1988 o programa CBERS (*Chine-Brazil Earth Resources Satellite*).

Os satélites CBERS foram projetados para cobertura global e contêm câmaras para observação óptica e um sistema de coleta de dados ambientais.

Esses satélites possuem três sensores de coleta de dados para recursos naturais, dos quais Moreira (2003) destaca as seguintes características:

- CCD (*Charge-Coupled Device*): é um sensor de alta resolução que fornece imagens de uma faixa de 113 km de largura no terreno e faz a cobertura completa do globo a cada 26 dias, desde que operado normalmente. As características do sensor CCD são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1- Característica do sensor CCD do satélite CBERS

| Bandas | Comp. de onda (μm) | Região do espectro | Resolução espacial (m) |
|--------|---------------------------------|--------------------|------------------------|
| B1 | 0,45 – 0,52 | Azul | 20 |
| B2 | 0,52 – 0,59 | Verde | 20 |
| B3 | 0,63 – 0,69 | Vermelho | 20 |
| B4 | 0,77 – 0,89 | IV próximo | 20 |
| B5PAN | 0,51 – 0,73 | V- IV próximo | 20 |

Fonte: adaptado de Moreira(2003)

- IR-MSS (*Infrared Multispectral Scanner Subsystem*): é uma câmara de varredura que opera nas faixas espectrais do visível até o termal. Este sensor fornece informações espectrais de alvos sobre a superfície terrestre numa faixa de 120 km de largura, e uma resolução temporal de 26 dias. As características do sensor IR-MSS são apresentadas na Tabela 2

Tabela 2 - Característica do sensor IR-MSS do satélite CBERS

| Bandas | Comp. de onda (μm) | Região do espectro | Resolução espacial (m) |
|--------|---------------------------------|--------------------|------------------------|
| B6 | 0,5 – 1,1 | V- IV próximo | 80 |
| B7 | 1,5 – 1,75 | IV médio | 80 |
| B8 | 2,08 – 2,35 | IV médio | 80 |
| B9 | 10,40 – 12,50 | IV termal | 80 |

Fonte: adaptado de Moreira (2003)

- WFI (*Wide Field Imager*): este sensor imageia uma faixa no terreno de 890 km de largura. Com este sensor é possível obter a cobertura completa do globo terrestre a cada cinco dias. As características do sensor WFI são apresentadas na Tabela 3

Tabela 3 - Característica do sensor WFI do satélite CBERS

| Bandas | Comp. de onda (µm) | Região do espectro | Resolução espacial (m) |
|--------|--------------------|--------------------|------------------------|
| B10 | 0,63 – 0,69 | Vermelho | 260 |
| B11 | 0,77 – 0,89 | IV próximo | 260 |

Fonte: adaptado de Moreira(2003)

De acordo com Ponzoni (2007), devido as suas características, os dados dos satélites CBERS têm sido utilizados em programas de monitoramento da cobertura vegetal da Amazônia, desenvolvidos pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e pelo Instituto Brasileiro de Meio Ambiente (IBAMA).

Entre as aplicações das imagens CBERS em estudos de eventos hidrológicos, está o realizado por Poelking et al. (2007) no estudo da dinâmica da vegetação em períodos de estresse hídrico.

Segundo os autores, as imagens de satélite CBERS-2 representaram um instrumento extremamente útil para monitoramento da superfície, possibilitando a obtenção de informações NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), no estudo da dinâmica da vegetação em períodos de estresse hídrico.

Jesus (2007) utilizou imagens CBERS para o estudo de simulação de inundações urbanas na cidade de Jacobina - BA, além de imagens de outros satélites.

Em suas conclusões, o mesmo autor destaca que o uso das imagens CBERS para estudos relacionados a processos hidrológicos apresentou resultados satisfatórios em relação aos dados relativos à permeabilidade do solo, porém deve-se observar os problemas relacionados a correção geométrica e radiométrica das bandas espectrais, para evitar problemas nos resultados.

4.5.Comportamento Espectral da Vegetação

Desde a descoberta de que os vegetais utilizam parte da radiação eletromagnética emitida pelo sol para viver, a interação entre a radiação e a vegetação passou a ser estudada mais detalhadamente (LIU, 2007).

Segundo Ponzoni (2001), o aprimoramento do conhecimento da interação entre a REM e a vegetação tem ocorrido pela realização de estudos dentro do que tem sido caracterizado como “comportamento espectral da vegetação”, utilizado para representar as características de reflectância da REM pelas folhas, plantas individuais e conjunto de plantas.

Ao comportamento espectral da vegetação, estão associados os conceitos de reflectância, transmitância e absortância espectral, porém o fenômeno mais analisado em sensoriamento remoto é a reflectância. Na Figura 1 está apresentada o espectro de reflectância de uma folha de vegetação verde e sadia.

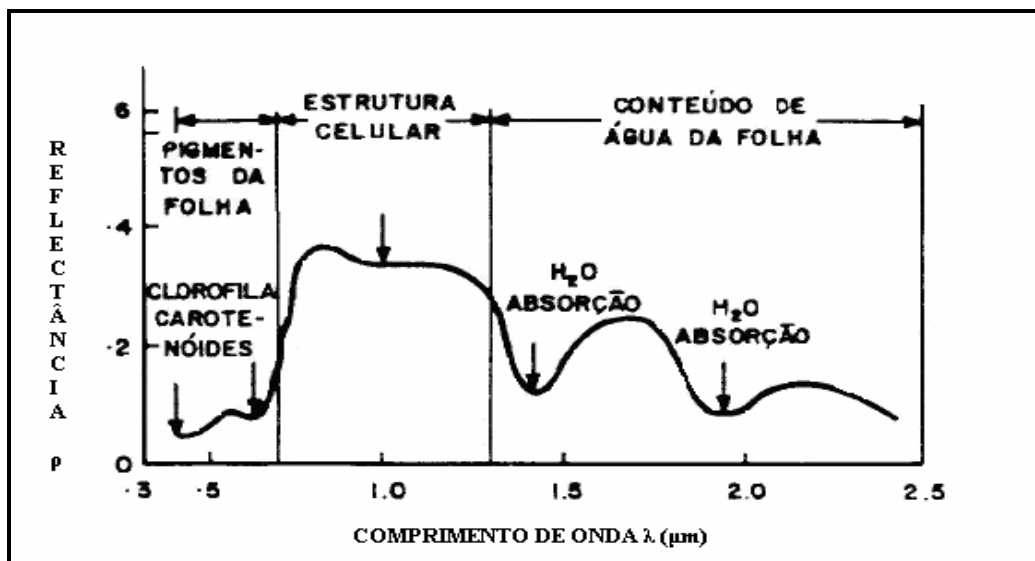


Figura 1- Espectro de reflectância de uma folha de vegetação verde e sadia.

Ponzoni (2001) afirma que, os estudos envolvendo a reflectância espectral de dosséis têm sido motivados majoritariamente pela necessidade de relacionar os diferentes comprimentos de onda, representados por níveis de cinza nas imagens, às diferentes tipologias vegetais.

Segundo o mesmo autor, para uma melhor compreensão do fenômeno de interação entre a REM e a vegetação, foram feitos estudos que desenvolveram modelos matemáticos fundamentados em aspectos físicos e/ou estocásticos.

A radiação solar incidente sobre um dossel é espalhada e refletida, tendo sua direção e comportamento espectral alterado de modo bastante complexo. Essa alteração ocorre devido a parâmetros do próprio dossel quanto por fatores ambientais, ou seja, suas interferências (PONZONI, 2001).

Dentre os diversos elementos constituintes da vegetação, a folha é o principal elemento de interação com a REM. Assim, com os resultados de diversos trabalhos a respeito das propriedades do espalhamento da REM, por parte de uma folha, Ponzoni (2001) relata como as principais:

A distribuição das reflectâncias, tanto para a região do visível, quanto para o infravermelho, caracteriza-se por aumentos nos valores de reflectância com o aumento do ângulo zenital de visada para a maioria dos ângulos azimutais.

A intensidade do retroespalhamento, ou seja, o espalhamento da direção de incidência da REM é maior na região do infravermelho que na região do visível;

Para ângulos de incidência próximos à normal (zero grau), a distribuição da reflectância pode ser considerada como a de uma superfície lambertiana, de forma que, com o aumento do ângulo zenital da fonte de iluminação, a folha torna-se cada vez mais uma superfície não lambertiana por assumir comportamento especular.

Além dessas propriedades do espalhamento das folhas, é necessário o conhecimento de sua composição química, principalmente o tipo e a quantidade de pigmentos fotossintetizantes e de sua morfologia interna (distribuição e quantidade de tecido, espaços intercelulares, etc.).

Com base nos resultados obtidos nos trabalhos de Norman et. Al (1985)¹ e Walter-Shea (1987)², Ponzoni (2001) destaca os principais aspectos relacionados ao comportamento espectral da folha em cada uma das regiões espectrais.

Na região do Visível (de 0,4 a 0,7 μm) os pigmentos existentes nas folhas dominam a reflectância espectral. Esses pigmentos, geralmente encontrados nos cloroplastos são: clorofila (65%), carotenos (6%), e xantofilas (29%).

As porcentagens desses pigmentos nas folhas podem variar de espécie para espécie. A energia radiante é absorvida seletivamente pela clorofila e é convertida em calor ou fluorescência e, fotoquimicamente, em energia estocada na forma de componentes orgânicos através da fotossíntese.

Os pigmentos predominantes absorvem na mesma região (próximo a 0,445 μm , a região do azul), mas somente a clorofila absorve na região do vermelho (0,645 μm). A maioria das plantas é moderadamente transparente na região do verde, (0,540 μm).

Na região do infravermelho próximo (de 0,725 a 1,10 μm) existe absorção pequena da REM e considerável espalhamento interno na folha. A absorção da água é geralmente baixa nessa região e a reflectância espectral é quase constante.

Na região do infravermelho de ondas curtas (de 1,3 a 2,0 μm) a absorção devida à água líquida predomina na reflectância espectral das folhas.

Ponzoni (2001) relata que, a transmitância das folhas na região do visível, aumenta com a infiltração de água. Ela preenche os espaços intercelulares, eliminando as interfaces na qual ocorreria a trajetória da REM, alterando a probabilidade de desvios.

4.6. Índices de Vegetação

No estudo da vegetação, o modelo de mistura espectral e o índice de vegetação são as transformações radiométricas mais utilizadas em imagens de satélites (PONZONI, 2007).

Segundo Wiegand et al. (1991)³ apud Moura (2000), os índices de vegetação são resultados de transformações lineares do fator de reflectância obtido em duas ou mais bandas espectrais, por meio de soma, razão, diferença ou outra relação matemática que possa ser combinada.

O principal objetivo do índice de vegetação é fazer a discriminação entre o que é vegetação e não-vegetação.

De acordo com Ponzoni (2007), diversos índices de vegetação têm sido propostos com o objetivo de explorar as propriedades espectrais da vegetação, especialmente na região do visível e do infravermelho próximo.

Segundo Baret et al. (1989)⁴ e Moreira (1997)⁵, ambos citados por Moura (2000), há duas razões básicas para o uso das faixas espectrais do vermelho visível e

¹ NORMAN, J.M., J.M. WELLES, AND E.A. WALTER. **Contrasts among bidirectional reflectance of leaves, canopies and soils.** IEEE Trans. GeoScience and Remote Sensing 1985,GE-23:659-677.

² WALTER-SHEA, E. A., , Laboratory and field measurements of leaf spectral properties and canopy architecture and their effects on canopy reflectance. PhD thesis, University of Nebraska, Lincoln, 1987, USA.

³ WIEGAND, GL; RICHARDSON, A.J.; ESCOBAR, D.E. **Vegetation index in crop assessment.** Remote Sensing of Environment, v.35, n.2, p.105-119. 1991.

⁴ BARET, F.; GUYOT, G.; MAJOR, D. J. **Crop biomass evaluation using radiometric measurements.** Photogrammetria (PRS), v.43, n.5, p. 241-256. 1989

do infravermelho próximo: a primeira é que elas estão presentes em quase todas as imagens de satélites e a segunda é que juntas fornecem acima de 90% das informações espectrais sobre a vegetação.

Ponzoni (2007) ressalta ainda que, quanto menores forem os comprimentos de onda, maior será a interferência da atmosfera, justificando a utilização das faixas espectrais do vermelho em detrimento à do azul e à do verde. Estas duas faixas possuem comprimento de ondas curto, os quais são espalhados pelos componentes da atmosfera (MOREIRA, 2003).

Os índices de vegetação são relacionados a parâmetros biofísicos da cobertura vegetal, como a biomassa e índice de área foliar.

Estes índices também têm a função de minimizar os efeitos de iluminação da cena, a declividade da superfície e a geometria de aquisição da imagem, os quais influenciam nos valores de reflectância da vegetação (PONZONI, 2007).

Dentre suas principais aplicações estão o monitoramento e a discriminação de uso de solos, a avaliação das condições de crescimento de culturas, as ocorrências de doenças, pragas, déficit hídrico, geadas, entre outros (LIU, 2007).

Vários índices de vegetação foram criados e modificados ao longo dos últimos anos. Segundo Liu (2007), o índice de vegetação ideal deve ser sensível à vegetação, insensível ao fundo do solo e não ter interferências da atmosfera.

Dentre os principais índices de vegetação, Liu (2007) destaca:

Índice de vegetação pela razão (*Ratio Vegetation Index – RVI*): é a razão das faixas de IVP e V.

$$RVI = \frac{IVP}{V} \quad (1)$$

onde :

RVI=índice de vegetação pela razão;

IVP= reflectância na faixa do infravermelho próximo (0,725 a 1,10 µm);

V= reflectância na faixa do visível (0,4 a 0,7µm).

Segundo Ponzoni (2007), para áreas densamente vegetadas, a quantidade refletida de radiação eletromagnética referente à região do vermelho alcança valores muito pequenos e, conseqüentemente, esta razão aumenta sem limites.

Índice de brilho de solo (*Soil Brightness Index – SBI*) e índice de vegetação verde (*Green Vegetation Index – GVI*): são dois índices de vegetação fundamentados na reflectância da copa da vegetação que são derivados da análise do componente principal das quatro faixas do Landsat MSS representando quatro características espectrais, sendo o brilho, o verde, o amarelo e nenhum desses três casos.

A maioria das variações espectrais de culturas pode ser discriminada pelo brilho do solo e grau de verde da vegetação. O valor do brilho representa o valor médio do albedo do solo que varia pouco durante o ciclo de uma cultura.

O grau de verde representa a concentração de clorofila interferindo na quantidade de biomassa da vegetação verde. As equações que representam esses índices são:

⁵ MOREIRA, M. A. **Déficit hídrico na cultura de trigo e o impacto na resposta espectral e em parâmetros agronômicos**. Piracicaba. 142p. Tese (Doutorado) – ESALQ/USP, 1999.

$$SBI = 0,332MSS4 + 0,603MSS5 + 0,675MSS6 + 0,262MSS7 \quad (2)$$

$$GVI = -0,238MSS4 - 0,66MSS5 + 0,577MSS6 + 0,388MSS7 \quad (3)$$

onde:

SBI=índice do brilho do solo (*Soil Brightness Index*);

GVI=índice de verde de vegetação (*Green Vegetation Index*)

Índice verde sobre solo nu (*Greenness Above Bare Soil – GABS*): é a diferença de grau de verde da superfície de vegetação e de solo nu. É utilizado para eliminar o efeito do solo na reflectância da vegetação. O valor do SBI é determinado durante o solo sem vegetação, que serve como um valor limiar e deve ser subtraído no valor do GVI. A Equação 4 representa o cálculo do GABS:

$$GABS = GVI - 0,09178SBI + 5,58959 \quad (4)$$

onde :

GABS= Índice verde sobre solo nu (*Greenness Above Bare Soil*)

Índice de vegetação pela diferença (*Difference Vegetation Index- DVI*): é calculado pela diferença da reflectância de IVP e V. Também infere a quantidade de vegetação verde, por isso as interferências atmosféricas também podem comprometer as interpretações dos valores obtidos nas várias condições atmosféricas.

$$DVI = IVP - V \quad (5)$$

onde:

DVI= índice de vegetação pela diferença (*Difference Vegetation Index*);

IVP= reflectância na faixa do infravermelho próximo (0,725 a 1,10 μm);

V= reflectância na faixa do visível (0,4 a 0,7 μm).

Índice de vegetação da diferença normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index- NDVI*): é calculado pela diferença de reflectância entre a faixa de IVP e a de V. Essa diferença é normalizada pela divisão da soma das faixas de IVP e V. A equação geral é:

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

onde:

NDVI=índice de vegetação da diferença normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index*);

IVP= reflectância da faixa do infravermelho próximo (0,725 a 1,10 μm);

V= reflectância da faixa do visível (0,4 a 0,7 μm).

O NDVI é sensível à presença da vegetação, pois a vegetação sadia usualmente diminui a resposta no vermelho devido à absorção por clorofila e aumenta a

resposta no infravermelho próximo devido ao espalhamento pelos tecidos da folha (TUCKER & SELLERS⁶, 1986 apud ALMEIDA & BATISTA, 1998).

O NDVI é o índice de vegetação mais conhecido e serve de base para comparações de todos os índices criados posteriormente (MOURA, 2000).

Como o NDVI é o resultado da combinação das duas bandas, ele encobre parcialmente os efeitos da presença dos constituintes atmosféricos e das perturbações radiométricas e geométricas, sendo esse fato uma das vantagens do NDVI sobre o RVI e DVI.

Por causa da normalização, os efeitos das variações de ângulos solares e ângulo de visada também são minimizados (HOLBEN⁷, 1986 apud LIU, 2007).

Para alvos terrestres, o limite inferior do NDVI torna-se aproximadamente zero. A refletância do IVP alcança valor máximo de 0,55 e o V mínimo de 0,5. Aplicando-se esses dados na equação que representa a NDVI, o limite superior máximo resultante para o NDVI é de 0,833 (LIU, 2007).

4.7. Evapotranspiração

Tucci (1993) conceitua a evapotranspiração como a perda de água por evaporação do solo e transpiração da planta, sendo importante para o balanço hídrico de uma bacia como um todo.

Já Liu (2007) define que a palavra evapotranspiração é composta pelas palavras evaporação e transpiração, que é a soma da perda de água da superfície do solo ou da água (evaporação) e da perda de água pela vegetação controlada pela abertura dos estômatos (transpiração).

O solo, as plantas e a atmosfera podem ser considerados componentes de um sistema fisicamente inter-relacionado e dinâmico, onde vários processos de fluxo estão interligados e onde é aplicável o conceito de potencial hídrico, ou seja, o fluxo de água ocorre nos pontos de maior potencial para o de menor potencial (TUCCI, 1993).

A quantidade diária de água transpirada é grande em relação às trocas de água na planta, assim, considera-se que o fluxo através da planta, em curtos períodos de tempo, é um processo em regime permanente (TUCCI, 1993).

A passagem da água para a atmosfera acontece através dos estômatos localizados nas folhas. O processo de transporte de água desde a folha até a massa de ar ocorre por difusão de vapor proporcional ao gradiente de tensão do vapor d'água (TUCCI, 1993).

É possível distinguir dois tipos de evapotranspiração: a potencial e a real.

A evapotranspiração potencial (ETP) é a quantidade de água transferida para a atmosfera por evaporação e por transpiração, na unidade de tempo, de uma superfície extensa completamente coberta de vegetação de porte baixo e bem suprida de água (Penman, 1956 apud Tucci, 1993);

⁶ TUCKER, C.J.; SELLERS, P.J. **Satellite remote sensing of primary production**. International Journal of Remote Sensing, 1986.7(11):1395-1416,

⁷ HOLBEN, B.N., **Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data**. International Journal of Remote Sensing, 1986.7 (11): 1417-1434.

A evapotranspiração real (ETR) é a quantidade de água transferida para a atmosfera por evaporação e transpiração nas condições reais existentes de fatores atmosféricos e umidade do solo.

A evapotranspiração real é igual ou menor que a evapotranspiração potencial ($ETR < ETP$) (GANGOPADHYAYA ET AL. 1968⁸, APUD TUCCI, 1993).

A ETP é comumente medida em unidades como mm/dia ou mm/hora. Segundo Liu (2007), a unidade dimensional de ETP em milímetros facilita o cálculo de balanço hídrico, porque a quantidade de chuva e água disponível no solo também é representada nesta unidade.

Segundo Tucci (1993), são escassas e de difícil obtenção informações confiáveis sobre a ETR, pois estas demandam longo período de tempo de observação e custam caro, pois requerem inúmeras medições e, para tanto, são necessários mão-de-obra e infra-estrutura laboratorial.

A ETP pode ser obtida a partir de modelos baseados em leis físicas e relações empíricas, de forma rápida e precisa.

Existem várias relações empíricas que relacionam a ETR e a ETP, porém Tucci (1993) afirma que nenhuma dessas teorias foi aceita universalmente.

De acordo com Liu (2007), a evapotranspiração pode ser afetada por diversos fatores, sendo eles divididos em cinco grupos: meteorológicos, geográficos, de solo, de planta e de microclima.

Liu (2007) define que os fatores meteorológicos são um conjunto do efeito complexo das interações entre a radiação, a temperatura, a umidade do ar, o vento e pressão na perda de água pela ETP.

Para facilitar o entendimento de cada fator que afeta a ETP, o mesmo autor considera somente o efeito de um determinado fator meteorológico, mantendo os demais fatores em estados inalterados, como descritos abaixo:

a) Radiação – a vegetação, para fabricar a matéria seca que a compõe através do processo de fotossíntese, requer a energia de radiação solar no comprimento de onda da faixa do visível. A radiação solar fornece um calor latente à água fazendo com que ela passe do estado líquido ao estado vapor, pela transpiração, para manter sua temperatura dentro da faixa ótima de crescimento.

b) Temperatura – a temperatura da superfície da água rege a taxa de ETP em que as moléculas de água de fase líquida passam para a fase gasosa e se incorporam no ar. Com isso, taxa de ETP aumenta quando há o aumento das temperaturas do ar e da água.

c) Umidade do ar – age indiretamente por depender da temperatura. A taxa de ETP é proporcional à diferença entre a umidade real e umidade de saturação do ar de uma determinada temperatura. A diminuição da temperatura do ar em um ambiente contendo certa quantidade de vapor d'água resulta no aumento da umidade relativa e na queda da ETP.

d) Vento – o ar úmido, sendo levado até o ar seco pelo movimento de ar, acaba por promover a perda de água pelas superfícies líquidas. O vento diminui a espessura da camada limite das folhas. A velocidade do vento também tem certa influência na taxa de ETP porque, em determinadas condições de umidade do ar, a

⁸ GANGOPADHYAYA, M.; URYVAEV, V. A.; OMAR, M.H. NORDENSON T.J.; HARBECK, GE. **Measurement and estimation of evapotranspiration.** Geneva: World meteorological Organization. (WMO Technical Note, 83)

queda da temperatura pelo efeito do vento pode aumentar a umidade do ar e diminuir a ETP.

e) Pressão barométrica - um decréscimo na pressão barométrica resulta no aumento da taxa de ETP. O aumento da ETP pela diminuição de pressão em regiões elevadas é acoplada à diminuição da ETP pela diminuição da temperatura, resultando na diminuição da ETP com o aumento da altitude.

Para os fatores de planta Liu (2007) afirma que a vegetação produz sombreamento no solo, diminuindo a temperatura, a velocidade do vento e o aumento da umidade relativa do ar na copa próxima ao solo, fazendo com que diminua a ETP. A taxa de evapotranspiração varia de espécie, estágio e vigor de crescimento das plantas.

Lima e Freire (1976) realizaram estimativas de Evapotranspiração em plantações de Eucalipto, Pinheiro e em vegetação herbácea natural em intervalos de tempo iguais a um mês. Verificou-se que os totais estacionais da evapotranspiração foram ligeiramente maiores para eucaliptos e pinheiros em comparação com a vegetação herbácea natural.

Para os fatores de microclima, Liu (2007) afirma que são consideradas as descontinuidades espaciais do clima pelos efeitos dos terrenos não-uniformes horizontalmente.

As diferenças microclimatológicas dos perfis de temperatura, umidades e ventos são causados devido à variação de radiação solar que incide sobre os diferentes declives, variação de distribuição de chuva espacial, variação de velocidade do vento por causa dos quebra-ventos e topografias diferentes.

Tucci (1993) relata alguns procedimentos usualmente empregados para medir ou estimar a evapotranspiração; medidas diretas; métodos baseados na temperatura; métodos baseados na radiação; método combinado e balanço hídrico.

Dentre as medidas diretas, o autor afirma que o lisímetro é tido como o mais correto para determinar a evapotranspiração. São constituídos de um reservatório de solo com volume mínimo de 1m³, providos de um sistema de drenagem e instrumental de operação, sendo que as medidas podem ser volumétricas ou de massa, dependendo do tipo de lisímetro.

As medidas de umidade do solo também são consideradas como medida direta. Essas consistem em sucessivas medidas do solo e permitem, por diferença, estabelecer um valor de evapotranspiração na ausência de precipitação e/ou irrigação.

Para os métodos baseados na temperatura, Tucci (1993) destaca os métodos de Thornthwaite e Blaney-Criddle.

Thornthwaite: a Equação 7 é baseada, segundo Chang (1968)⁹ em dados de precipitação e escoamento, de inúmeras bacias hidrográficas dos Estados Unidos, onde predomina o clima temperado com invernos úmidos e verões secos.

Esse método correlaciona estas informações com a variável temperatura e possibilita a estimativa da evapotranspiração.

$$ETP = Fc \times 16 \left(\frac{T}{I} \right)^a \quad (7)$$

⁹ CHANG, J.H. *Climatte and agriculture: an ecological survey*. Chicago : Adline. 1968 ,304p.

onde:

ETP= evapotranspiração potencial para meses de 30 dias e comprimento de 12 horas (mm/mês);

T= temperatura média do ar (°C)

Fc= fator de correção em função da latitude e mês do ano.

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{ti}{5} \right)^{1,514} \quad (8)$$

onde:

T e ti =temperaturas do mês analisados em °C.

Segundo Tucci (1993), o método Blaney-Criddle foi descrito por Kijne (1978)¹⁰ e foi desenvolvido originalmente para estimativas de uso consuntivo em regiões semi-áridas, baseado na suposição de que a disponibilidade de água para a planta em crescimento não é um fator limitante. A equação de Blaney-Criddle é apresentada a seguir:

$$ETP = (0,457T + 8,13)p \quad (9)$$

onde:

ETP= evapotranspiração potencial (mm/mês);

T= temperatura média mensal do ar (°C);

p= porcentagem diária de luz

Tucci (1993) afirma que, para aumentar a confiabilidade dos dados obtidos, pode-se incluir um coeficiente de cultura K_c , que deve ser determinado em lisímetros, para cada cultura e local de interesse. Sendo assim, a equação é:

$$ET + ETP.k_c \quad (10)$$

onde:

ET= evapotranspiração estimada para determinada cultura e local de interesse (mm/dia);

K_c = coeficiente da cultura.

Para Tucci (1993), as situações em que a advecção possa ser desconsiderada, os métodos baseados na radiação são mais confiáveis.

O autor ainda cita que a equação de Jensen e Haise, descrita por Kijne (1978) é um exemplo desse método, apresentando bons resultados em diferentes condições climáticas, devido à inclusão da temperatura do ar.

¹⁰ KIJNE, J.W. **Determinación de la evapotranspiración.** In: ILRI. **Principios y aplicaciones del drenaje.** Wageningen, 1978. v.3, cap. 19, p. 59-108

$$ETP = (0,025T + 0,08) \frac{G}{59} \quad (11)$$

onde:

ETP= evapotranspiração potencial (mm/dia);

T= temperatura do ar (° C);

G= radiação incidente de onda curta (cal.cm⁻².dia⁻¹).

O método combinado ou equação de Penmam (Equação 12) é usado para estimativas de evapotranspiração potencial, apesar de ter sido desenvolvido para o cálculo da evaporação de superfícies livres de água. Segundo Liu (2007), é uma combinação de métodos de balanço de energia e aerodinâmica.

$$ET = C \{ [w \times Rn] + [(1 - w)f(u)(e_s - e_a)] \} \quad (12)$$

onde:

ET= Evapotranspiração (em mm/dia);

w= peso que varia com a temperatura e latitude;

Rn= radiação sola líquida (em mm/dia);

e_s e e_a= a pressão de vapor saturada e pressão do ar (em mbar);

c= fator corrigido para compensar os efeitos climáticos do dia e da noite;

f(u)= 0,27 (1+U²/100), U₂ é o vento na altura de 2 metros.

Conforme Liu (2007), Jackson et al. (1977)¹¹ simplificaram o método de Penmam que estima ET em função de Rn e o gradiente de temperatura entre o ar e a superfície (Equação 13). O gradiente da pressão do vapor foi introduzido para estimar diretamente a ETP.

$$ET = \frac{(mRN + 0,28Ea)}{(m + 0,27)} \quad (13)$$

onde:

ET= Evapotranspiração (mm/dia).

Ea= 0,35 (e_s-e_a)(1+U/100) (mm/dia) em que e_s e e_a= a pressão de vapor saturada e pressão do ar (mbar);

Rn= radiação líquida (mm/dia);

m= declividade da curva de pressão de vapor na temperatura médio do ar Ta (°F).

O método Penmam modificado por Montieth (1963)¹² apresenta termos de resistência da vegetação e resistência do ar. A Equação deste é apresentada na Equação 14.

¹¹ JACKSON, R.D., REGINATO, R.J., IDSO, S.B. **Wheat canopy temperature: a practical tool for evaluating water requirements.** Water Resources Research, Washington, v. 13, n. 3, p. 651-656, 1977.

¹² MONTEITH, J.L. **Gas exchanges in plant communities.** In: EVANS, L.T. Environmental Control of Plant Growth, Camberra: Academic Press, 1963. p. 95-111.

$$ET = \frac{[\Delta(Rn - G)] + \rho_a C_p (e_s - e_a) / r_a}{(\Delta + \gamma) [1 + (r_c / r_a)]} \quad (14)$$

onde:

ET= evapotranspiração, (cal cm⁻²mim⁻¹ ou mm/min);
 Δ =de/dT, o declive da pressão vapor saturada entre a superfície e o ar;
Rn=radiação líquida (cal cm⁻²mim⁻¹)
G=fluxo de calor ao solo (cal cm⁻²mim⁻¹);
e_a= pressão do ar (mbar);
e_s= pressão de vapor de saturação na superfície, em mb;
r_a= resistência do ar (s cm⁻¹);
r_c= resistência da copa da vegetação (cm⁻¹);
 γ =Cp P/Lvη=0,66

4.8. Estudos relacionados aos NDVI e a estimativa de ETP.

Dentre os estudos que relacionam o NDVI com a ETP, vale destacar o realizado por Rossato et al. (2005). Os autores fizeram a estimativa de ETP para toda a área do Brasil, utilizando os dados de NDVI.

Os dados de ETP foram calculados pelo método Penman-Monteith usando dados meteorológicos de 194 estações distribuídas pelo território brasileiro. As imagens NDVI foram feitas por meio das imagens do sensor AVHRR (*advanced very High Resolution Radiometer*) do satélite NOAA.

Foi encontrado um alto valor de correlação entre a ETP e o NDVI (r=0,81), mostrando uma relação linear próxima entre as variáveis.

Os mesmos autores concluíram que o NDVI é uma importante variável para o monitoramento indireto da ETP para grandes áreas, e que essa relação pode ser estudada em pequenas áreas, para cada tipo de cobertura vegetal, desde que se tenha um bom número de dados espaciais e temporais.

Ogawa et al. (1999) fizeram a estimativa de Evapotranspiração da por meio de NDVI para o *Tade River* localizado no *Saga Plains* no Japão.

O método Penman foi utilizado pelos autores acima para a ETP correspondente a diversos tipos de cobertura dos solos. Também foi utilizado um método de cálculo de evaporação dos corpos d'água (*Water Budget Method*).

As imagens NDVI foram geradas a partir dos dados do satélite SPOT.

As correlações obtidas para os diversos tipos de cobertura de solo, tais como florestas, área urbana e solo exposto, apresentaram coeficientes de correlação variando de 0,50 a 0,75, sendo que os maiores valores foram apresentados para as regiões de solo exposto.

Dentre as conclusões, os autores afirmaram que a ETP diária pode ser estimada usando a regressão linear, sendo que para erros entre 2% e 40% o *water budget method* pode ser usado para ajustar os valores.

Sánchez e Carvacho (2006), realizaram análises de regressão múltipla entre valores de evapotranspiração potencial ETP, estimados com método empírico de

Penman (1948)¹³ e produtos de imagens NOAA/AVHRR, tais como índice de vegetação da diferença normalizada - NDVI e índices de temperatura da superfície. De acordo com os a correlação obtida, foi possível observar a grande utilidade do sensoriamento remoto na determinação da ETP e em escala regional.

Os autores ainda ressaltam que a precisão das informações geradas em relação a ETP dependem do método convencional selecionado e da qualidade da informação derivada das imagens de satélites.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1. Fluxograma do trabalho

Abaixo é a apresentado o fluxograma seguido para a realização do presente trabalho (Figura 2).

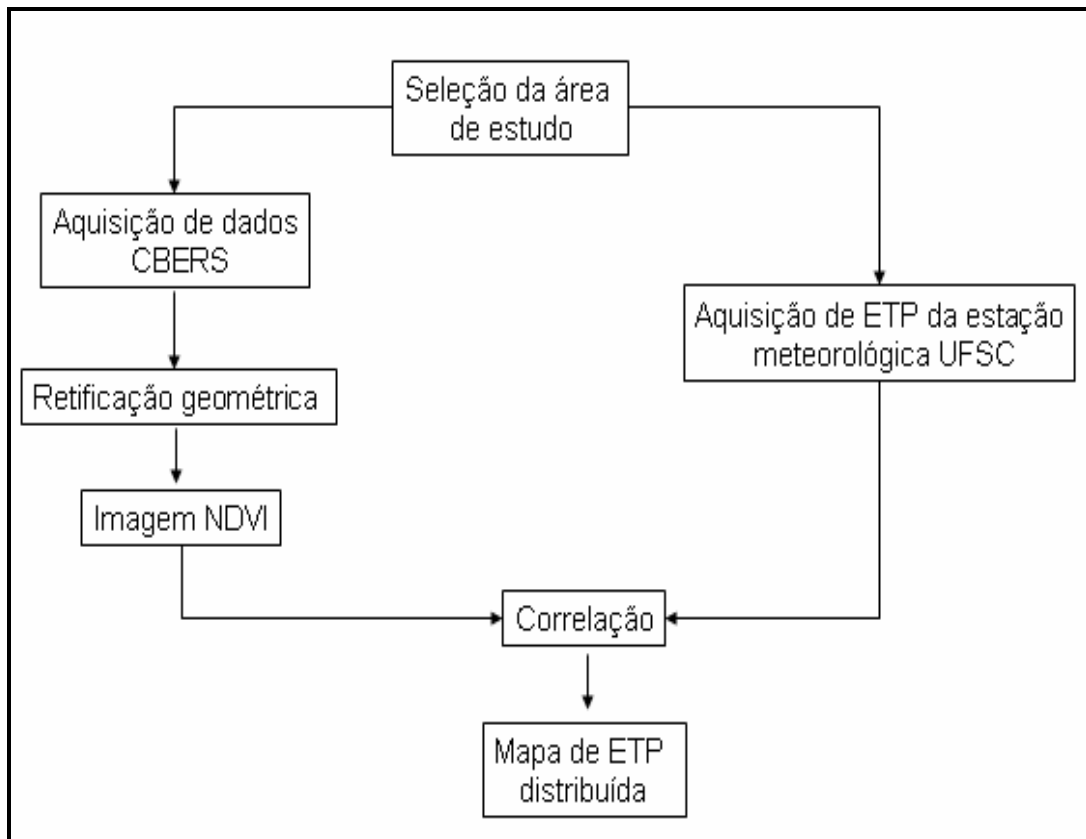


Figura 2 - Fluxograma do trabalho

¹³ PENMAN, H. **Natural evaporation from open water, bare soil and grass**. Proc. Royal Society London A, 1948, N°193, p.120-146.

5.2. Caracterização da área de estudo - A microbacia do Itacorubi

A área de estudo, do presente trabalho, é a microbacia do Itacorubi¹⁴ (Figura 2 e 3), localizada na Ilha de Santa Catarina, no município de Florianópolis-SC, que possui área aproximada de 23 Km² e está localizada entre as latitudes de 27°34'07"–27°37'57" S e longitudes 48°28'25" – 48°33'00" W.



Figura 3 - Localização da microbacia do Itacorubi – Florianópolis (SC)

¹⁴ Segundo Rocha (1991, p.30) apud Pinto et Al (2007), a denominação de bacias hidrográficas podem ser divididas em microbacias (<200 km²), sub-bacia (200 a 3.000km²) e bacias propriamente ditas (acima de 3.000 km²). A área estudada possui aproximadamente 23 km

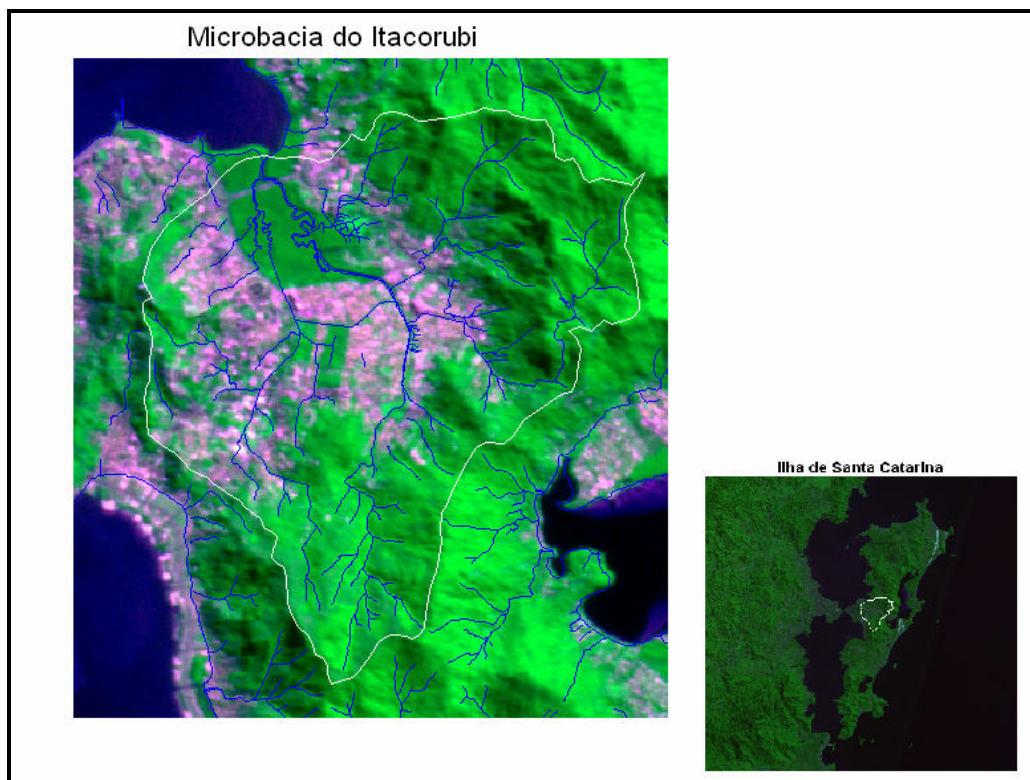


Figura 4 - Imagem CBERS-2/CCD, de 22/07/2006, em composição RGB-234 com o limite da Microbacia do Itacorubi – Florianópolis (SC).

A população local é de aproximadamente 45.000 habitantes. Nesta região, encontram-se bairros residenciais e comerciais, a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), além de escolas da rede municipal e estadual de educação e outros serviços. Toda esta infra-estrutura faz com que a população flutuante diária seja estimada em 90.000 pessoas/dia (PINTO et al, 2007).

Segundo os estudos do NEA (2003), a microbacia é constituída por duas unidades geomorfológicas: o complexo cristalino do proterozóico superior ao eopaleozóico e por depósitos sedimentares do Quaternário.

O sistema cristalino está representado por granitos e granodioritos, e a planície sedimentar está constituída por sedimentos argílico-sóltico-arenosos típicos de mangues, areno-sílticos-argilosos de baías e lagunas e colúvio-alúvio-eluvionares indiferenciados.

A cobertura vegetal da microbacia é de aproximadamente 15 Km², com predominância da vegetação secundária.

Na parte Nordeste da bacia, em áreas mais elevadas ocorre a Floresta Ombrófila Mista, ocupando uma área de 150m².

Na planície sedimentar há a presença de mangue, sendo sua área de aproximadamente 1,42 Km². Esta região é conhecida como manguezal do Itacorubi. (SORIANO-SIERRA, 1993).

A precipitação é de aproximadamente 1500 mm.ano⁻¹ na Ilha de Santa Catarina e a umidade relativa média mensal do ar é de aproximadamente de 82% enquanto que as taxas médias anuais de evaporação são de 1019 mm. Na região, as massas de ar quente Tropical Atlântica e Tropical Continental provocam ventos do quadrante

norte, enquanto massas frias (Polares) são transportadas por ventos frios e úmidos desde o quadrante sul (DUTRA, 1998).

Atualmente, a rede hidrográfica da microbacia do Rio Itacorubi está bastante alterada. Os afluentes que compõem a microbacia estão assoreados e poluídos, e recebem uma grande contribuição de ligações clandestinas de esgoto, sendo que a maioria escoam para o manguezal.

Basicamente, o problema pode ser qualificado como resultado de uma ocupação urbana com pouca ou nenhuma preocupação ambiental (SANTOS et al. 2006).

5.3. Histórico da microbacia

A evolução urbana da área, conforme Bueno (2000) apud Cristo (2002), ocorreu no século XIX como consequência do deslocamento das populações Luso-Açorianas para o interior da Ilha de Santa Catarina na busca de terras. Assim surgem as Freguesias caracterizadas como chácaras dedicadas à agricultura de subsistência e criação de animais, como as da Santíssima Trindade, Pantanal e Itacorubi.

Na década de 60 com a criação da Universidade Federal de Santa Catarina, os bairros próximos passaram a desenvolver-se, crescendo a urbanização em decorrência, também, da implantação de instituições públicas. Ainda, de acordo com a mesma autora, o desenvolvimento dos bairros proporcionou o surgimento de novos aglomerados urbanos com características residenciais como o Córrego Grande e o Santa Mônica, propiciando o comércio e a especulação imobiliária, induzindo as populações carentes a venderem seus lotes e se deslocarem para lugares afastados de difíceis acessos.

Em decorrência desse crescimento surgem os primeiros núcleos urbanos, ocupando encostas e morros, sendo acrescidos posteriormente com pessoas vindas do campo em função do êxodo rural. Durante a década de 80 surgem os prédios residenciais e os conjuntos habitacionais aumentando a densidade demográfica, que é crescente até os dias atuais (BUENO, 2000).

Atualmente a área encontra-se intensamente ocupada, e a vegetação nativa tem dado lugar a novas habitações, e as áreas naturais remanescentes têm sofrido fortes pressões, como consequência da valorização imobiliária da região.

A ausência de planejamento e a fiscalização deficiente no cumprimento da legislação relativa a restrições contribuíram para que a região se tornasse propícia à ocorrência de inundações. A ocupação intensa dos lotes com adensamento e carga demográfica elevada, por sua vez, facilitam a geração do escoamento superficial, além de causarem sérios prejuízos aos ecossistemas e à qualidade de vida. (NEA, 2003).

5.4. Materiais utilizados

Os materiais utilizados para a realização do presente trabalho foram os seguintes:

- SIG: IDRISI ANDES Versão 15.0;
- Imagens do satélite CBERS-2, com resolução de 20 metros, registradas no dia 22 de julho de 2006 pelo sensor CCD, órbita 155, ponto 131, com 0% de cobertura de nuvens. Adquiridas gratuitamente pelo site do INPE

(<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/manage.php?INDICE=CB2CCD15513120060722&DONTSHOW=0>)

- Fotografias aéreas na escala de 1:2000, datadas de 2002; base do IPUF
- Cartas topográficas na escala de 1:2000 de Florianópolis, base do IPUF;
- Dados do dia 22 de julho de 2006 da estação meteorológica do campus da UFSC (Anexo 1).

5.3.1 Correção Geométrica e Registro das Imagens CBERS/CCD

A imagem de 22 de julho de 2006 foi corrigida geometricamente utilizando-se fotografias aéreas previamente georreferenciadas, na escala de 1:2000 como referência.

A correção geométrica foi realizada por meio de pontos de controle identificados na imagem de satélite e na fotografia aérea, utilizando a transformação que relaciona as coordenadas de ambas.

Foram utilizadas como referência a projeção “*Universal Transverse Mercator - UTM*”, o datum SAD/69 (*South American Datum -1969*) e as coordenadas da imagem (linhas e colunas).

Os diferentes sistemas de coordenadas foram relacionados por meio de uma transformação polinomial de primeiro grau, que requer no mínimo três pontos de controle para a correção geométrica da imagem.

Para a área de estudo, foram utilizados nove pontos de controle, devidamente distribuídos por toda a imagem, verificando se o erro estava dentro do limite aceitável. O erro máximo aceitável deve ser menor ou igual a um pixel (20m).

O método de reamostragem utilizado foi o vizinho mais próximo, que consiste em realocar o valor do *pixel*, aleatoriamente escolhido, ao valor médio do *pixel* mais próximo. Segundo Crosta (1992), esse método é simples de ser implementado e o que melhor preserva o valor radiométrico (número digital) da imagem original.

Os resultados da correção geométrica da imagem foram avaliados, utilizando o erro médio quadrático (*Root Mean Square – RMS*), calculado pela expressão (Equação 15), onde os valores correspondem às diferenças entre as posições dos pontos de controle utilizados como referência e as novas posições da imagem de saída.

$$RMS = \sqrt{e_1^2 + e_2^2 + e_3^2 + \dots + e_n^2 / n} \quad (15)$$

onde:

e= diferença entre as posições dos pontos de controle e os pontos nas imagens após a transformação (coordenadas x,y);

n= número de pontos de controle utilizados na transformação.

O limite da área de estudo foi digitalizado em formato vetorial a partir das informações das cartas topográficas (escala 1:2000) elaboradas pelo IPUF (Instituto de Planejamento Urbano de Florianópolis) em 2004.

Em seguida, foi gerada uma máscara binária com *pixel* de 20x20m, por meio do algoritmo de transformação de dados vetoriais em matriciais do SIG.

Esta máscara foi utilizada para extrair a área referente à bacia. Para isso, utilizou-se uma álgebra de mapas, multiplicando-se a máscara binária (0 e 1) pela imagem referente a bacia.

5.3.2 Geração de imagem NDVI

Após a fase de pré-processamento, as imagens encontraram-se adequadamente corrigidas para aplicação das transformações radiométricas.

Com isso, foi gerado e avaliado o NDVI, dando ênfase à discriminação das áreas de vegetação.

O NDVI foi gerado por meio de diferença normalizada, aplicada às bandas do vermelho e do infravermelho próximo (módulo *Vegindex* do SIG).

Como dados de entrada na geração do NDVI foram utilizadas as bandas 3 e 4 do sensor CCD-CBERS2, correspondendo à região do vermelho (0,63 a 0,69 μm) e infravermelho próximo (0,77 a 0,89 μm), respectivamente.

5.3.3 Correlação entre os dados NDVI e ETP

Os dados meteorológicos utilizados correspondem a ETP obtida no momento exato da passagem do imageador do sensor CCD/CBERS 2, ou seja, às 10h07m do dia 22 de julho de 2006.

O valor da ETP foi coletado da estação meteorológica da Universidade Federal de Santa Catarina, que faz o monitoramento hidrológico automático e intensivo em intervalos de um minuto.

O valor médio de NDVI foi obtido através do histograma da imagem, fazendo-se uso de uma máscara binária para que os valores dos *pixels* externos a bacia não fossem considerados no cálculo.

A máscara binária é uma matriz onde os valores internos e externo à bacia são 1 e 0, respectivamente. Os valores iguais a zero foram desconsiderados pelo algoritmo no cálculo do histograma.

Em seguida, foi feita uma correlação linear entre esse valor e o de ETP instantânea obtida da estação meteorológica.

A correlação linear foi gerada em gráfico do Excel e resultou na equação de ETP em função do valor de NDVI.

5.3.4 Geração de imagem de ETP Distribuída

A partir da equação da ETP (Equação 16) em função do NDVI, foi gerada a imagem ETP distribuída. Por essa imagem se obtêm o valor de ETP distribuída de acordo com o valor de NDVI de cada *pixel*.

Essa imagem foi gerada por meio de álgebra de mapas disponibilizada no SIG.

A equação utilizada no SIG para a geração da imagem é apresentada na Equação 16:

$$ETP = K * (imagem) \tag{16}$$

onde:

ETP = Evapotranspiração Potencial (mm.h⁻¹);

Imagem = imagem NDVI da microbacia do Itacorubi.

K= constante equivalente ao coeficiente angular da reta obtida na correlação entre ETP e NDVI.

6. RESULTADOS

6.1. Correção Geométrica e registro das Imagens CBERS/CCD

A correção geométrica da imagem CBERS/CCD foi satisfatória, pois a precisão obtida foi de 0,57 *pixel* correspondendo a 11,4 m. Esse resultado é aceitável por estar dentro do limite máximo de um *pixel* (20m).

A avaliação desse procedimento foi feita por meio do erro médio quadrático (RMS) dado pelas diferenças entre a localização dos pontos de controle (referência) e as coordenadas de tela da imagem, apresentada na Equação 15.

6.2. Imagem NDVI

A Figura 5 apresenta a imagem NDVI.

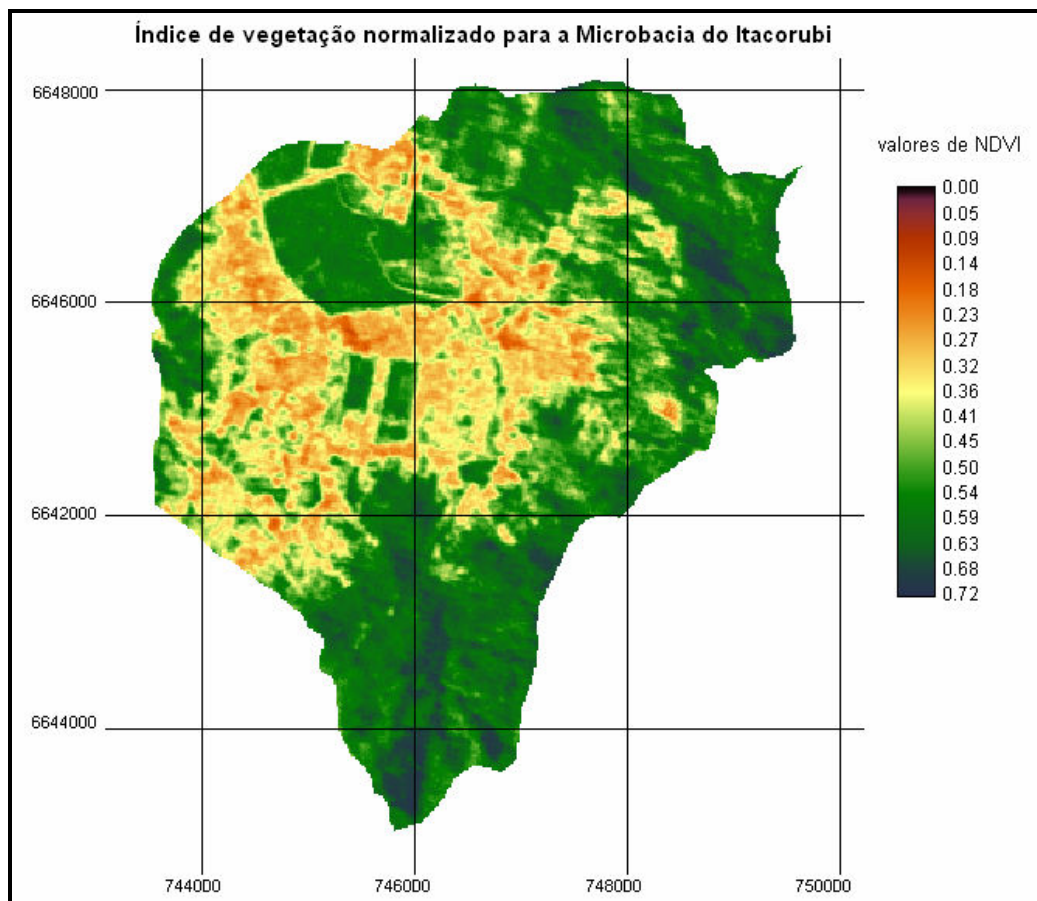


Figura 5 - Imagem NDVI da microbacia do Itacorubi

Na Figura 5 é possível observar que a vegetação se destaca em relação aos demais elementos da imagem, como solo exposto, água e área urbana.

A fração da imagem correspondente à vegetação é apresentada na escala de verde da tabela de cores disponibilizada pelo aplicativo para essa representação. Os valores de NDVI para essa fração foram os mais próximos de 1. O restante dos alvos presentes na imagem como solo exposto, área urbana, entre outros estão representados pela escala de cores que varia entre o amarelo e o vermelho, e correspondem aos valores mais próximos de zero.

Segundo Poelking et al. (2007), a água tendo baixa reflectância na faixa do infravermelho próximo deveria ser representada por valores negativos próximos a -1.

Como a hidrografia da microbacia é constituída de rios com larguras inferiores a resolução da imagem de satélite que é de 20 metros, os *pixels* referentes a eles apresentaram valores de NDVI positivos próximos de zero, pois a representação do mesmo é realizada uma média da reflectância entre a água e o solo ou vegetação presente.

Para verificar a quantidade de *pixels* compreendidos dentro das classes de NDVI, foi gerado um histograma da imagem, conforme apresentado na Figura 5

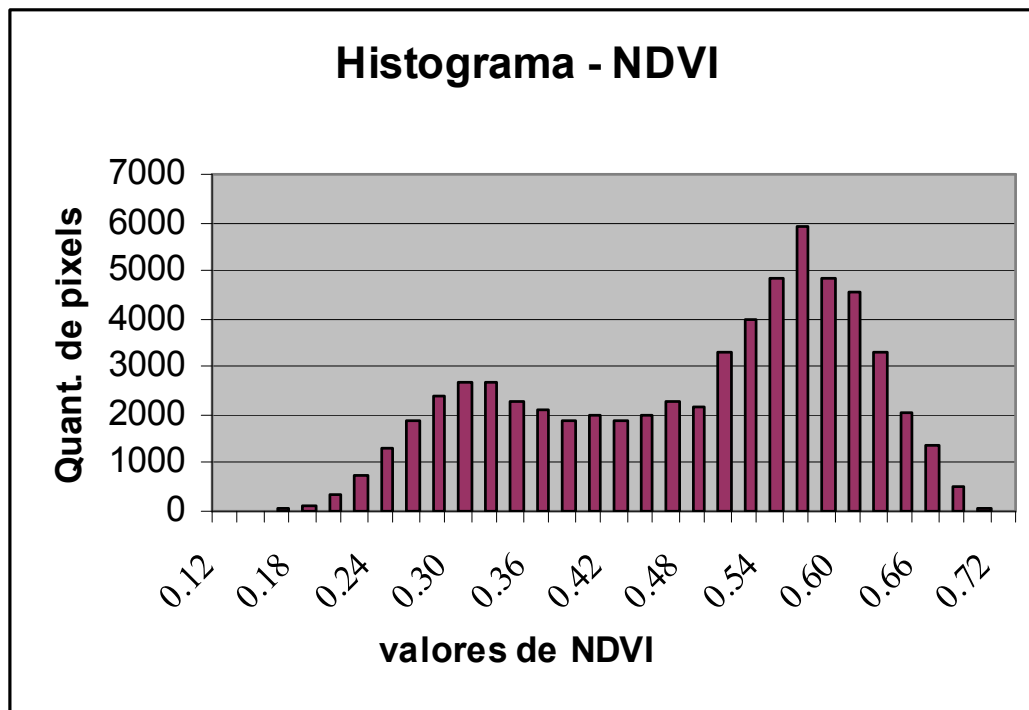


Figura 6 - Histograma da imagem NDVI

O histograma foi construído com base em 63615 *pixels*, correspondendo ao número total de *pixels* da imagem que cobre a microbacia do Itacorubi.

No eixo das abscissas estão os valores de NDVI, sendo que cada classe tem uma amplitude de 0,02 unidades. O eixo (y) representa a frequência de *pixels* em relação aos valores de NDVI (x) determinados para a microbacia de estudo.

O valor médio de NDVI encontrado foi de 0,48 e o desvio padrão de 0,125. O valor máximo de NDVI foi 0,72 e o mínimo zero. O valor médio de NDVI indica que grande parte da área da bacia é coberta por vegetação, pois este ficou próximo aos valores máximos deste índice para a área total, onde se encontram uma maior densidade de vegetação.

Analisando o histograma verifica-se que existe uma maior quantidade de *pixels* com valores de NDVI entre de 0,51 e 0,61. Os valores acima de 0,51 foram considerados como vegetação. Por serem os mais próximos de 1. A faixa de NDVI acima desse valor representa aproximadamente 52% da área da microbacia, indicando uma grande quantidade de vegetação. Isto pode estar indicando que a evapotranspiração pode estar sendo produzida, em sua maior parte, nas áreas de vegetação densa da microbacia.

6.3. Correlação entre os dados de NDVI e ETP

O dado de ETP foi obtido por meio do acesso à página eletrônica do LABHIDRO – Laboratório de Hidrologia da UFSC que disponibiliza os dados gerados pela microestação meteorológica (<http://www.labhidro.ufsc.br/estacaom.html>). Estes dados estão disponíveis em anexo.

Como a ETP instantânea foi obtida no mesmo momento da passagem do satélite CBERS sobre a área de estudo, foi possível efetuar a correlação por meio de regressão linear com os valores de NDVI, conforme é apresentado na Figura 7.

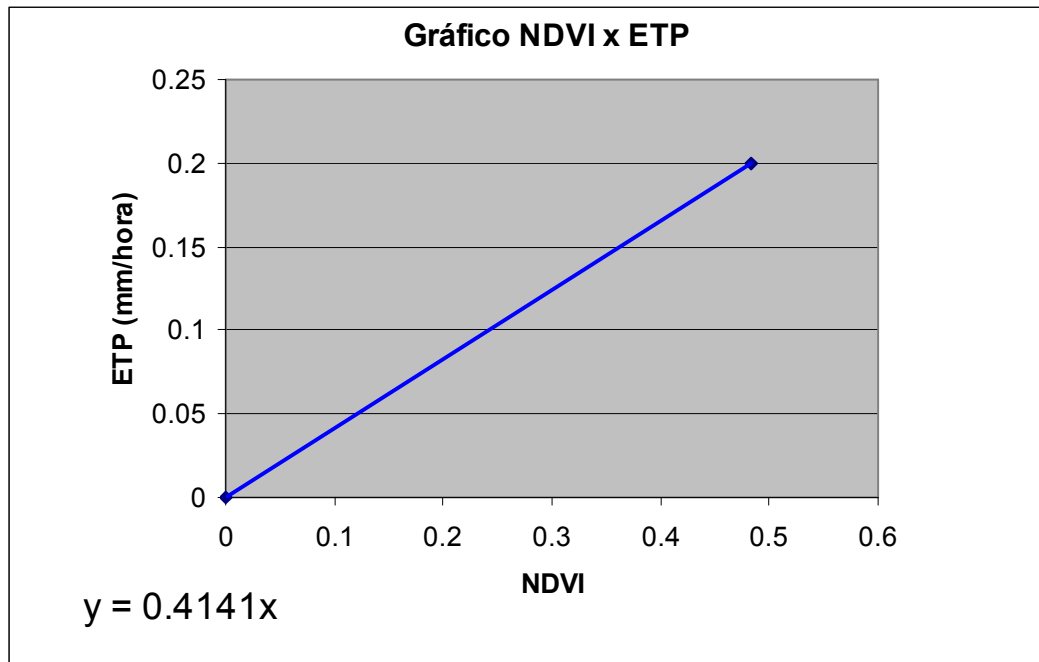


Figura 7 - Regressão Linear entre valores de NDVI e o ETP instantânea

A correlação obtida é apresentada na Equação 18:

$$ETP = 0,4141 \times NDVI \quad (18)$$

onde:

ETP= Evapotranspiração Potencial (mm.h^{-1});

NDVI= índice de vegetação da diferença normalizada.

A constante 0,4141 equivale ao coeficiente angular da reta obtida na correlação entre ETP e NDVI.

A correlação foi gerada somente com dois pontos do gráfico devido à ausência de outras microestações meteorológicas na microbacia e, conseqüentemente, sem outros dados de ETP.

O primeiro ponto é a intersecção dos eixos da abscissa com o da ordenada, considerando que, onde o valor de NDVI é igual à zero, não existe ETP.

O segundo ponto corresponde ao valor médio de NDVI da imagem e o valor de ETP instantânea, sendo o valor igual a 0,48 e 0,2, respectivamente.

6.4. Imagem de ETP Distribuída

A imagem ETP gerada é apresentada na Figura 8.

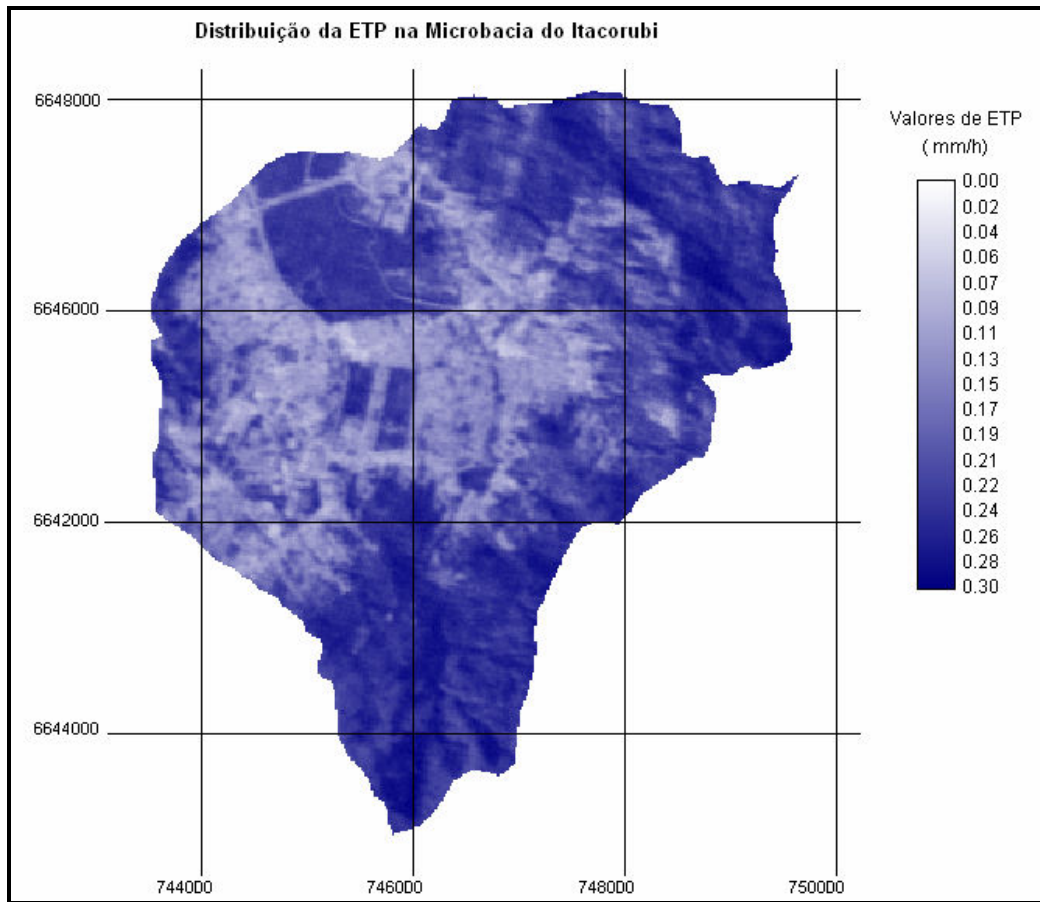


Figura 8 - ETP distribuída da microbacia do Itacorubi

A geração do mapa de ETP distribuída possibilitou verificar as áreas onde ocorrem as maiores taxas de evapotranspiração na microbacia do Itacorubi.

As frações de imagem, onde estão os maiores valores de ETP, estão representados por tons de azul escuro, enquanto que os menores valores apresentaram tonalidades mais claras, próximas ao branco.

Os *pixels* com tonalidades próximas ao branco representam as áreas onde há solo exposto e áreas urbanas, com baixos valores de ETP.

Para verificar a quantidade de *pixels* compreendidos dentro das classes de ETP distribuída, foi gerado um histograma da imagem, conforme apresentado na Figura 9

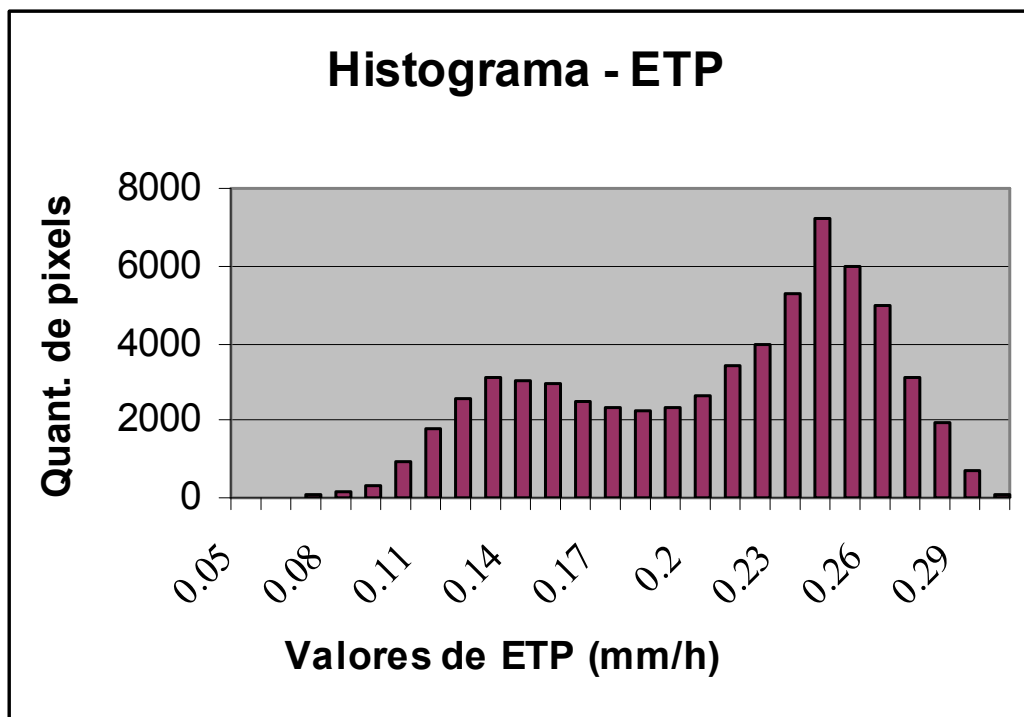


Figura 9 - Histograma do Mapa de ETP distribuída

O histograma foi construído com base em 63615 *pixels*, correspondendo ao número total da imagem que cobre a microbacia do Itacorubi.

No eixo das abscissas estão os valores de ETP distribuída, sendo que cada classe tem uma amplitude de 0,01 unidades.

O eixo das ordenadas representa a frequência de *pixels* em relação à ETP. O valor médio de ETP é 0,20 e o desvio padrão 0,05. O valor máximo de ETP foi aproximadamente 0,3 e o mínimo zero.

Analisando o histograma verifica-se que a maior quantidade de *pixels* com valores de ETP está na faixa entre 0,21 e 0,25.

Os valores de ETP acima representam aproximadamente 52% da área total da microbacia.

Para verificar a acurácia dos dados, analisou-se o valor de ETP obtida no *pixel* onde se encontra a estação meteorológica da UFSC. A estação está localizada nas coordenadas E 744908m e N 6944756m, do fuso 22S, conforme mostra o mapa de ETP (Figura 10). O valor encontrado foi de 0,19, com desvio percentual de 5% em relação ao valor real medido (0,2). Devido ao pequeno desvio percentual, pode-se verificar a boa acurácia dos resultados encontrados.

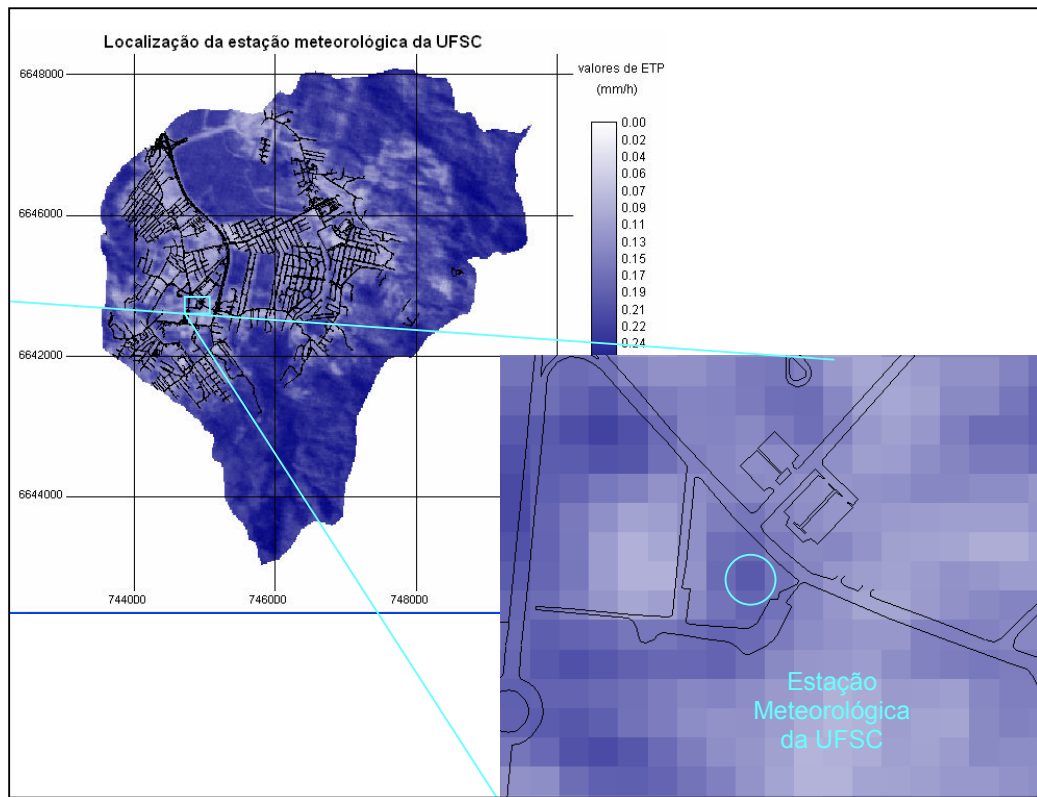


Figura 10 - Detalhe do pixel da Estação Meteorológica da UFSC

Os resultados encontrados indicam que o balanço hídrico da bacia é fortemente influenciado pela presença da vegetação, pois foram observadas altas frequências de valores de ETP nas regiões cobertas pela vegetação.

7. CONCLUSÃO

Nas condições em que foi realizado este estudo conclui-se que:

O uso de imagens do sensor CCD/CBERS2, com resolução de 20m, apresentou resultados satisfatórios para a produção de imagem NDVI, de acordo com o objetivo do estudo.

Apesar da boa resolução espacial das imagens do sensor CCD/CBERS, imagens com resoluções maiores possibilitariam a geração de imagens NDVI com maior precisão, em consequência da área relativamente pequena da microbacia.

O dado disponível da estação meteorológica da UFSC, associado à imagem NDVI da microbacia do Itacorubi, permitiu a produção de um mapa de ETP distribuída.

Foi possível verificar a correlação entre os dados de ETP instantânea e a imagem NDVI da microbacia.

Através do mapa da ETP distribuída em relação ao NDVI foi possível verificar valores com boa precisão de ETP nos diferentes pontos da microbacia e sucessivamente a maior contribuição da ETP nas regiões com maior densidade vegetativa.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, E.S. de; BATISTA, G. T. **Índice de vegetação versus precipitação na Amazônia.** In: Anais IX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Santos, Brasil, 11-18 setembro 1998, INPE, p. 1397-1407.
- BURROUGH, P. A. **Principles of geographical information system for land resources assessments.** Oxford: Oxford University, 1990, 194p.
- CÂMARA NETO, G. **Modelagem Conceitual e Operações em SIG.** 1995.
- CHAVES, Joselisa Maria; ROCHA, Washington J. S da Franca. **Geotecnologias: trilhando novos caminhos nas geociências.** Salvador: SGB, 2006, 222 p.
- CRISTO, Sandro S. V. de. **Análise de susceptibilidade a riscos naturais relacionados às enchentes e deslizamentos do setor leste da Bacia Hidrográfica do Itacorubi, Florianópolis - SC.** 2002, 209f. Dissertação (Mestrado em Geografia), Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis-SC.
- CRÓSTA, A.P. **Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto.** Instituto de Geociências, Departamento de Metalogênese e Geoquímica, Unicamp, Campinas, 1992.
- DUTRA, S. J. **A Bacia hidrográfica do Córrego Grande, Ilha de Santa Catarina, Brasil.** Cap. 2: 31-46. In: Soriano-Sierra, E. J. & Sierra de Ledo (Eds.). Ecologia e Gerenciamento do Manguezal de Itacorubi. NEMAR, CCB, UFSC, 1998.
- GOMES, M. F. T.; RODRIGUES, R. **Modelação hidrológica distribuída na Bacia Hidrológica do Rio Guadiana.** In: 4º Congresso da água. INAG-DSRH. 1998
- JESUS, J. A. **Simulação de inundações urbanas com imagens CBERS, DEM STRM e levantamentos GPS - Estudo de caso da cidade de Jacobina - BA.** In: Anais XIII Simpósio brasileiro de Sensoriamento remoto. Florianópolis, Brasil. INPE, 2007.p. 929-927.
- LIMA, W. de P.; FREIRE, O. **Evapotranspiração em plantações de Eucalipto e de Pinheiro, e em vegetação herbácea natural.** IPEF 1976, n.12, p.103-117.
- LIU, William Tse Horng. **Aplicações de Sensoriamento Remoto.** Campo Grande: Ed. UNIDERP, 2006. 908p.
- MOREIRA, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação.** UFV, Viçosa, 2003. 2ª Edição.
- MENEZES, S. J.M. C.; SEDIYAMA G.C.; SOARES V.P.; GLERIANI J.M.; PINTO, F.A.C.; ANDRADE R. G. **Evapotranspiração regional utilizando o SEBAL em condições de relevo montanhoso.** In: Anais XIII Simpósio Brasileiro

de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 3475-3482.

MENDES, H. C. MARCO, G. ANDRADE, J. P. M.; SOUZA, S. A. MACEDO, R. F. **Reflexões sobre o impacto das inundações e propostas de políticas públicas mitigadoras.** USP, Universidade de São Paulo. Material do curso de Hidrologia Física. 2004.

NOVO, E.M.L.M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações.** São Paulo, Edgard Blücher, 1989.

OGAWA S.; MURAKAMI T.; ISHITSUKA N.; SAITO G. **Evapotranspiration Estimates from fine-resolution NDVI.** ACRS, Japan, 1999.

PINTO, J. F.; STEFFENS, J. L.; OLIVEIRA F. H. **Análise Físico-Ambiental Urbana da Microbacia do Rio Itacorubi, Florianópolis – SC, visando o uso do software SIG.** In: Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 2007, INPE, p. 3011-3018.

POELKING, E. L.; LAUERMANN, A.; DALMOLIN, R. S. D. **Imagens CBERS na geração de NDVI no estudo da dinâmica da vegetação em período de estresse hídrico.** In: Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 2007, INPE p. 4145-4150.

ROSSATO, L.; AVALÁ, R. C. S.; FERREIRA, N. J.; TOMASELLA, J. **Evapotranspiration estimation in the Brazil using NDVI data.** In: SPIE International Symposium on Remote Sensing: Proceedings of the 12th International Symposium Remote Sensing-SPIE, 1, ISBN 2005.

SÁNCHEZ, M.; CARVACHO, L. **Estimación de evapotranspiración potencial, ETP, a partir de imágenes NOAAVHRR en la VI Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.** In: Revista de Geografía Norte Grande, 2006, N° 36, p. 49-60.

SORIANO-SIERRA, E.J. **Caracterização ecológica dos biótopos e sua ocupação pelas comunidades vegetais no Manguezal de Itacorubi (Ilha de Santa Catarina, SC, Brasil).** Trab. Concurso Publ. Prof. Adjunto, UFSC, 1993. 124p.

SOUZA, Mara Estela de. **Utilização de Sistema de Informação Geográfica (SIG) na análise do meio físico. Estudo de caso: a área do município de campinas entre meridianos 47°15' e 46°45" W e os paralelos 22° 45' e 22° 51' S.** 1997. 99f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP

TUCCI, C.E.M. 1993. **Hidrologia Ciência e Aplicação.** Editora UFRGS, EDUSP ABRH 952p.

VICTORIA, Daniel de Castro. **Estimativa de Evapotranspiração da bacia do Ji-Paraná (RO) através de técnicas de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento.** 2004. 107f. Dissertação (Mestrado em Ecologia de Agrossistemas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba-SP.

VIEIRA, P. B. H.; PINTO, J. F. GALVÃO, M. L.; SANTOS, L. K. S. **Utilizando SIG na Análise Urbana da Microbacia do Rio Itacorubi, Florianópolis - SC.** IN: COBRAC 2006 - Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário. USFC, Florianópolis, 2006

Sites:

INPE

<http://www.inpe.br/unidades/cep/atividadescep/educasere/apostila.htm>
Acessado dia 28/10/2007.

LABHIDRO - Laboratório de Hidrologia da UFSC

<http://www.labhidro.ufsc.br/estacaom.html>

Manuais de Tutorial de geoprocessamento (SPRING).

http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/introducao_pro.html#realce
Acessado no dia 21/11/2007

NEA (Núcleo de Estudos da Água) / LABDREN (Laboratório de Drenagem Urbana) / Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Florianópolis. Hidrologia da Bacia do Itacorubi. Disponível na Internet em:

<http://www.labdren.ufsc.br/pesquisa/itacorubi/index.php?secao=conceito>.
Acessado em: 14 de julho de 2007.

9. ANEXOS

Dados da Estação meteorológica da UFSC

| DATE | TIME | Temp out | Hi Temp | Out hum | Dew Pt. | Wind Speed | Wind Dir | Wind run | Hi Speed | Hi Dir. | Wind Chill | Heat Index |
|----------|-------|----------|---------|---------|---------|------------|----------|----------|----------|---------|------------|------------|
| 22/07/06 | 0:00 | 15.3 | 15.3 | 91 | 13.8 | 0 | --- | 0 | 0 | --- | 15.3 | 15.4 |
| 22/07/06 | 1:00 | 14.8 | 14.8 | 93 | 13.7 | 0 | --- | 0 | 0 | --- | 14.8 | 14.9 |
| 22/07/06 | 2:00 | 14.3 | 14.3 | 94 | 13.4 | 0 | --- | 0 | 0 | --- | 14.3 | 14.4 |
| 22/07/06 | 3:00 | 14.2 | 14.2 | 94 | 13.3 | 0 | --- | 0 | 0 | --- | 14.2 | 14.3 |
| 22/07/06 | 4:00 | 13.7 | 13.7 | 94 | 12.8 | 0 | --- | 0 | 0 | --- | 13.7 | 13.8 |
| 22/07/06 | 5:00 | 14 | 14 | 96 | 13.4 | 0 | --- | 0 | 0 | --- | 14 | 14.2 |
| 22/07/06 | 6:00 | 13.7 | 13.7 | 96 | 13.1 | 0 | --- | 0 | 0 | --- | 13.7 | 13.8 |
| 22/07/06 | 7:00 | 13.7 | 13.7 | 96 | 13 | 0 | --- | 0 | 0 | --- | 13.7 | 13.8 |
| 22/07/06 | 8:00 | 15.2 | 15.3 | 96 | 14.6 | 0 | --- | 0 | 0 | --- | 15.2 | 15.4 |
| 22/07/06 | 9:00 | 19.3 | 19.3 | 80 | 15.8 | 1.6 | N | 0.03 | 4.8 | N | 19.3 | 19.9 |
| 22/07/06 | 10:00 | 21 | 21 | 73 | 16 | 0 | --- | 0 | 0 | --- | 21 | 21.3 |
| 22/07/06 | 11:00 | 24.1 | 24.1 | 59 | 15.6 | 1.6 | NNE | 0.03 | 4.8 | NNE | 24.1 | 24.5 |
| 22/07/06 | 12:00 | 25.4 | 25.4 | 57 | 16.3 | 0 | NNE | 0 | 1.6 | NNE | 25.4 | 25.7 |
| 22/07/06 | 13:00 | 27.1 | 27.1 | 53 | 16.7 | 0 | --- | 0 | 0 | --- | 27.1 | 27.4 |
| 22/07/06 | 14:00 | 29.7 | 29.7 | 34 | 12.2 | 6.4 | NNE | 0.11 | 9.7 | NNE | 29.7 | 29.2 |
| 22/07/06 | 15:00 | 29.6 | 29.6 | 37 | 13.4 | 1.6 | ENE | 0.03 | 4.8 | ENE | 29.6 | 29.4 |
| 22/07/06 | 16:00 | 28.7 | 28.7 | 37 | 12.5 | 3.2 | NNE | 0.05 | 9.7 | NNE | 28.7 | 28.4 |
| 22/07/06 | 17:00 | 26.4 | 26.4 | 44 | 13.2 | 0 | NNE | 0 | 1.6 | NNE | 26.4 | 26.2 |
| 22/07/06 | 18:00 | 24.4 | 24.4 | 49 | 13 | 6.4 | NNE | 0.11 | 11.3 | WNW | 24.4 | 24.4 |
| 22/07/06 | 19:00 | 22.2 | 22.2 | 58 | 13.5 | 0 | --- | 0 | 0 | --- | 22.2 | 22 |
| 22/07/06 | 20:00 | 22.3 | 22.3 | 56 | 13.1 | 0 | --- | 0 | 0 | --- | 22.3 | 22.1 |
| 22/07/06 | 21:00 | 21.2 | 21.2 | 67 | 14.8 | 0 | --- | 0 | 0 | --- | 21.2 | 21.1 |
| 22/07/06 | 22:00 | 19.2 | 19.2 | 79 | 15.5 | 0 | --- | 0 | 0 | --- | 19.2 | 19.7 |
| 22/07/06 | 23:00 | 18.2 | 18.2 | 87 | 16 | 0 | --- | 0 | 0 | --- | 18.2 | 18.6 |

Dados da Estação meteorológica da UFSC

| DATE | TIME | THR Index | THSW index | rain | rain rate | Sola rad | Solar Energy | Hi. Solar Rad | Hi. Solar Rad | index | UV dose | uv vu |
|----------|-------|-----------|------------|------|-----------|----------|--------------|---------------|---------------|-------|---------|-------|
| 22/07/06 | 0:00 | 15.4 | 13.9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 22/07/06 | 1:00 | 14.9 | 13.4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 22/07/06 | 2:00 | 14.4 | 12.9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 22/07/06 | 3:00 | 14.3 | 12.8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 22/07/06 | 4:00 | 13.8 | 12.3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 22/07/06 | 6:00 | 13.8 | 12.3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 22/07/06 | 7:00 | 13.8 | 12.2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 22/07/06 | 8:00 | 15.4 | 17 | 0 | 0 | 118 | 0.17 | 118 | 118 | 0 | 0 | 0 |
| 22/07/06 | 9:00 | 19.9 | 24.6 | 0 | 0 | 292 | 0.42 | 292 | 292 | 0.8 | 0.01 | 0.8 |
| 22/07/06 | 10:00 | 21.3 | 26.9 | 0 | 0 | 436 | 0.63 | 436 | 436 | 1.9 | 0.01 | 1.9 |
| 22/07/06 | 11:00 | 24.5 | 30.4 | 0 | 0 | 544 | 0.78 | 544 | 544 | 2.9 | 0.02 | 2.9 |
| 22/07/06 | 12:00 | 25.7 | 31.8 | 0 | 0 | 588 | 0.84 | 588 | 588 | 3.5 | 0.03 | 3.5 |
| 22/07/06 | 13:00 | 27.4 | 33.4 | 0 | 0 | 577 | 0.83 | 577 | 577 | 3.4 | 0.02 | 3.4 |
| 22/07/06 | 14:00 | 29.2 | 34.7 | 0 | 0 | 509 | 0.73 | 509 | 509 | 2.7 | 0.02 | 2.7 |
| 22/07/06 | 15:00 | 29.4 | 34.4 | 0 | 0 | 380 | 0.54 | 380 | 380 | 1.6 | 0.01 | 1.6 |
| 22/07/06 | 16:00 | 28.4 | 31.9 | 0 | 0 | 223 | 0.32 | 223 | 223 | 0.8 | 0.01 | 0.8 |
| 22/07/06 | 17:00 | 26.2 | 24.9 | 0 | 0 | 21 | 0.03 | 21 | 21 | 0 | 0 | 0 |
| 22/07/06 | 18:00 | 24.4 | 22.8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 22/07/06 | 19:00 | 22 | 20.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 22/07/06 | 20:00 | 22.1 | 20.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 22/07/06 | 21:00 | 21.1 | 19.7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 22/07/06 | 22:00 | 19.7 | 18.3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 22/07/06 | 23:00 | 18.6 | 17.2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Dados da Estação meteorológica da UFSC

| DATE | TIME | Cool Temp | In hum | In Het | In ET | Samp | Wind Tx | Wind Recept | ISS int |
|----------|-------|-----------|--------|--------|-------|------|---------|-------------|---------|
| 22/07/06 | 0:00 | 0 | 22 | 13.4 | 0.000 | 22 | 1 | 1 | 95.7 |
| 22/07/06 | 1:00 | 0 | 21.8 | 13.7 | 0.000 | 22 | 1 | 1 | 95.7 |
| 22/07/06 | 2:00 | 0 | 21.6 | 14 | 0.000 | 22 | 1 | 1 | 95.7 |
| 22/07/06 | 3:00 | 0 | 21.2 | 13.6 | 0.000 | 22 | 1 | 1 | 95.7 |
| 22/07/06 | 4:00 | 0 | 21.1 | 13.7 | 0.000 | 22 | 1 | 1 | 95.7 |
| 22/07/06 | 5:00 | 0 | 20.9 | 13.6 | 0.000 | 22 | 1 | 1 | 95.7 |
| 22/07/06 | 6:00 | 0 | 20.8 | 13.7 | 0.000 | 21 | 1 | 1 | 91.3 |
| 22/07/06 | 7:00 | 0 | 20.6 | 13.7 | 0.000 | 22 | 1 | 1 | 95.7 |
| 22/07/06 | 8:00 | 0 | 20.7 | 13.6 | 0.030 | 22 | 1 | 1 | 95.7 |
| 22/07/06 | 9:00 | 0.001 | 25.9 | 15.9 | 0.100 | 22 | 1 | 1 | 95.7 |
| 22/07/06 | 10:00 | 0.002 | 29.6 | 15 | 0.200 | 22 | 1 | 1 | 95.7 |
| 22/07/06 | 11:00 | 0.004 | 31.9 | 13.6 | 0.300 | 22 | 1 | 1 | 95.7 |
| 22/07/06 | 12:00 | 0.005 | 32.7 | 12.4 | 0.380 | 22 | 1 | 1 | 95.7 |
| 22/07/06 | 13:00 | 0.006 | 33.1 | 12.2 | 0.380 | 17 | 1 | 1 | 73.9 |
| 22/07/06 | 14:00 | 0.008 | 33.8 | 11.6 | 0.410 | 21 | 1 | 1 | 91.3 |
| 22/07/06 | 15:00 | 0.008 | 33.6 | 12 | 0.330 | 21 | 1 | 1 | 91.3 |
| 22/07/06 | 16:00 | 0.007 | 32.5 | 12.2 | 0.230 | 21 | 1 | 1 | 91.3 |
| 22/07/06 | 17:00 | 0.006 | 30.4 | 11.8 | 0.100 | 22 | 1 | 1 | 95.7 |
| 22/07/06 | 18:00 | 0.004 | 27.4 | 11.5 | 0.030 | 22 | 1 | 1 | 95.7 |
| 22/07/06 | 19:00 | 0.003 | 25.8 | 10.8 | 0.050 | 21 | 1 | 1 | 91.3 |
| 22/07/06 | 20:00 | 0.003 | 24.7 | 10.9 | 0.050 | 22 | 1 | 1 | 95.7 |
| 22/07/06 | 21:00 | 0.002 | 24.2 | 11.5 | 0.050 | 21 | 1 | 1 | 91.3 |
| 22/07/06 | 22:00 | 0.001 | 23.8 | 11.8 | 0.030 | 22 | 1 | 1 | 95.7 |
| 22/07/06 | 23:00 | 0 | 23.3 | 12.3 | 0.030 | 22 | 1 | 1 | 95.7 |