



Universidade de Brasília – UnB
Instituto de Geociências – IGD
Programa de Pós-Graduação *Stricto*
Sensu em Geociências Aplicadas e
Geodinâmica

**POTENCIALIDADE DOS DADOS PLANETSCOPE PARA A IDENTIFICAÇÃO DA
INTERFERÊNCIA ANTRÓPICA EM ELEMENTOS DO CICLO HIDROLÓGICO NO
CAMPUS DARCY RIBEIRO**

Marcela Dupont Britto

DISSERTAÇÃO Nº 175

Brasília, DF

2020

Universidade de Brasília – UnB
Instituto de Geociências – IGD
Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Geociências Aplicadas e
Geodinâmica

**POTENCIALIDADE DOS DADOS PLANETSCOPE PARA A IDENTIFICAÇÃO DA
INTERFERÊNCIA ANTRÓPICA EM ELEMENTOS DO CICLO HIDROLÓGICO NO
CAMPUS DARCY RIBEIRO**

Marcela Dupont Britto

Prof. Dr. Gustavo Macedo de Mello Baptista
Orientador

Dissertação de Mestrado apresentada à
Banca Examinadora do Instituto de
Geociências da Universidade de Brasília,
como exigência para obtenção do Título de
Mestre em Geociências Aplicadas e
Geodinâmica (área de concentração –
Recursos Hídricos e Meio Ambiente).

BRASÍLIA, DF

2020

FICHA CATALOGRÁFICA

DB862p Dupont Britto, Marcela
POTENCIALIDADE DOS DADOS PLANETSCOPE PARA A
IDENTIFICAÇÃO DA INTERFERÊNCIA ANTRÓPICA EM ELEMENTOS DO
CICLO HIDROLÓGICO NO CAMPUS DARCY RIBEIRO / Marcela Dupont
Britto; orientador Gustavo Macedo de Mello Baptista. --
Brasília, 2020.
78 p.

Dissertação (Mestrado - Mestrado em Geociências
Aplicadas) -- Universidade de Brasília, 2020.

1. Hidrologia. 2. Elementos do ciclo hidrológico. 3.
Vegetação. 4. Sensoriamento Remoto. 5. Dados Planet. I.
Macedo de Mello Baptista, Gustavo, orient. II. Título.

Universidade de Brasília – UnB
Instituto de Geociências – IGD
Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Geociências Aplicadas

**POTENCIALIDADE DOS DADOS PLANETSCOPE PARA A IDENTIFICAÇÃO DA
INTERFERÊNCIA ANTRÓPICA EM ELEMENTOS DO CICLO HIDROLÓGICO NO
CAMPUS DARCY RIBEIRO**

Marcela Dupont Britto

BANCA EXAMINADORA

Orientador
Dr. Gustavo Macedo de Mello Baptista

Avaliador Interno
Dra. Luciana Figueiredo Prado

Avaliador Externo
Dra. Suzy Cristina Pedroza da Silva

Brasília, 30 de outubro de 2020

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por todas as bênçãos e por sempre guiar e iluminar meu caminho.

Agradeço à minha mãe, Silvia, que sempre acreditou em mim e na minha capacidade de realização.

Ao meu namorado maravilhoso, Rodrigo, por toda a compreensão, parceria, paciência e consultorias durante toda essa jornada.

Ao meu querido orientador, Gustavo, por ter me estendido a mão e me possibilitado iniciar e seguir nesse caminho que sempre foi um sonho. Muito obrigada por ter acreditado em mim durante todas as etapas do processo.

À minha irmã Camila, meus tios Sônia e Carlos e minha avó Marlene, por todo amor e carinho que sempre recebi. Agradeço também ao meu tio e padrinho, Deodoro, por todo o suporte tanto na vida acadêmica, quanto fora dela.

Agradeço a Sá, Tella e todas as Chicas queridas que sempre estiveram ao meu lado por todo o amor, carinho e companheirismo.

Por fim, agradeço aos colegas de curso por dividir experiências e angústias nesses anos de mestrado.

"Ele me ensinou que coragem só é mesmo coragem quando sentimos um imenso medo. Dizia ele que, quando nos arremessamos a fazer alguma coisa que em princípio exige coragem, deve existir junto uma dose de medo, senão a empreitada se revela irresponsável. Pode-se estar diante de uma loucura, de um desatino ou estupidez. A coragem é justamente sentir o medo que enrijece a alma e o poder de enfrentar o desafio serena e positivamente. "

A Semente da Vitória, Nuno Cobra

BRITTO, D. M. **POTENCIALIDADE DOS DADOS PLANETSCOPE PARA A IDENTIFICAÇÃO DA INTERFERÊNCIA ANTRÓPICA EM ELEMENTOS DO CICLO HIDROLÓGICO NO CAMPUS DARCY RIBEIRO**. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2020.

RESUMO

O movimento da água entre atmosfera, superfície e subsuperfície terrestre promove a sua distribuição e disponibilidade, fatores necessários à vida na terra. A vegetação desempenha papel fundamental na continuidade dessa transferência constante de água, funcionando como elemento do ciclo hidrológico. Solos amplamente vegetados têm maior capacidade de infiltração e, solos sem vegetação, densamente compactados, ou até mesmo áreas construídas, se tornam impermeáveis. Sendo assim, é importante o monitoramento desses elementos do ciclo hidrológico de modo a mitigar possíveis impactos antrópicos e manter o equilíbrio ecossistêmico. O presente trabalho objetivou verificar a potencialidade de identificar áreas componentes do ciclo hidrológico – interceptação, infiltração e geração de escoamento superficial – por meio da análise do comportamento da vegetação, se utilizando do índice de vegetação CO2flux a partir de imagens multiespectrais Planet de alta resolução espacial (3 metros). O CO2flux é um índice de vegetação que integra outros dois índices – NDVI e sPRI – os quais são baseados na detecção do nível de atividade fotossintética das plantas – e foi utilizado para a avaliação da eficiência do sequestro de carbono pela vegetação. Os resultados obtidos atestam a potencialidade do uso do CO2flux advindo das imagens Planet, pois foi possível identificar áreas com e sem vegetação, e diferenciar os estratos vegetativos na análise. Em períodos de estiagem a vegetação sofre diminuição da atividade fotossintética, entretanto não de maneira uniforme. Os estratos vegetativos se comportam diferente uns dos outros – a vegetação arbórea, em geral, demonstra pouca variabilidade entre períodos secos e chuvosos. Já a vegetação herbácea apresenta níveis de atividade fotossintética inferiores em épocas de seca. A partir dessa análise, foi possível identificar áreas onde ocorre a interceptação da água da chuva, áreas onde potencialmente ocorre a infiltração e, ainda, áreas impermeabilizadas (construídas ou de solo exposto) onde ocorre o escoamento superficial.

Palavras-chave: sensoriamento remoto; sequestro de carbono; variação sazonal; ciclo hidrológico; vegetação urbana.

ABSTRACT

The water flux between atmosphere and terrestrial surface and subsurface promotes its distribution and availability, necessary factors for life on earth. Vegetation plays a fundamental role in the continuity of this constant water transfer, functioning as an element of the hydrological cycle. Widely vegetated soils have a greater capacity for infiltration and soils without vegetation, densely compacted (or built up areas) become impervious. Therefore, it is important to monitor these elements of the hydrological cycle in order to mitigate possible anthropic impacts and maintain the ecosystem balance. The present work aimed to verify the potential of identifying component areas of the hydrological cycle - interception, infiltration and occurrence of superficial runoff – through the analysis of vegetation behavior, using the CO2flux vegetation index from high spatial resolution (3 meters) Planet multispectral images. CO2flux is a vegetation index that integrates two other indices – NDVI and sPRI - which are based on detection of photosynthetic activity levels – and has been used here to evaluate the efficiency of carbon sequestration by vegetation. The results obtained attest to the potential use of CO2flux arising from Planet images, as it was possible to identify areas with and without vegetation, and differentiate the vegetative strata in the analysis. In periods of drought the vegetation's photosynthetic activity decreases, however not uniformly. The vegetative strata behave differently from each other - tree vegetation, in general, shows little variability between dry and rainy periods. Herbaceous vegetation photosynthetic activity is lower in times of drought. From this analysis, it was possible to identify areas where rainwater interception occurs, areas where infiltration potentially occurs, and even impermeable areas (built up or exposed soil) where superficial runoff occurs.

Key words: remote sensing; carbon sequestration; seasonal variation; hydrological cycle; urban vegetation.

ÍNDICE

LISTA DE ABREVIACÕES	1
INTRODUÇÃO.....	2
1. OBJETIVOS E HIPÓTESE	6
1.1 OBJETIVO GERAL	6
1.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	6
1.2 HIPÓTESE	6
2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	7
3. REFERÊNCIAS	8
CAPÍTULO 1 – O estudo dos componentes do ciclo hidrológico desde métodos tradicionais até o uso de sensoriamento remoto: uma revisão.....	10
RESUMO	10
ABSTRACT.....	11
INTRODUÇÃO	12
1. DESENVOLVIMENTO	13
1.1 Interceptação da água da chuva.....	13
1.2 Infiltração e escoamento superficial.....	17
1.3 Sensoriamento Remoto	23
2. CONCLUSÃO	34
3. REFERÊNCIAS.....	35
CAPÍTULO 2: Potencialidade do CO ₂ flux para identificação dos elementos do ciclo hidrológico com dados Planet.....	39
RESUMO	39
ABSTRACT.....	40
INTRODUÇÃO	41
1. MATERIAL E MÉTODOS.....	43
2. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	50
2.1 Comportamento Sazonal da Vegetação.....	50
2.2 Balanço Hídrico	57
2.3 Análise Discriminante	59
3. CONCLUSÃO	64
4. REFERÊNCIAS.....	66
CONSIDERAÇÕES FINAIS	69

LISTA DE ABREVIATÓES

CO₂flux – Índice de sequestro de carbono pela vegetação

ET – Evapotranspiração

ETP – Evapotranspiração Potencial

NDVI – Normalized Difference Vegetation Index (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada)

P – Precipitação

PRI – Photochemical Reflectance Index (Índice de Reflectância Fotoquímica)

sPRI – Valores de PRI reescalados

INTRODUÇÃO

A água é um dos componentes ambientais mais importantes para a vida no planeta. Entre os recursos de que a planta necessita para crescer e funcionar, a água é ao mesmo tempo o mais abundante e o mais limitante, o que faz com que a distribuição da vegetação sobre a superfície terrestre seja controlada principalmente pela sua disponibilidade. A fonte universal de energia da biosfera é o sol e a quase totalidade da vida em nosso planeta é direta ou indiretamente dependente da fotossíntese. A atividade fotossintética das plantas promove a conversão da energia solar em moléculas orgânicas ricas em energia (biomassa), a partir de moléculas inorgânicas simples, como o CO₂ (dióxido de carbono) e a H₂O (água) (PIMENTA, 2004).

A distribuição populacional no espaço tem importante correlação com a análise do fluxo de carbono que é sequestrado pela fotossíntese, mostrando como esse sequestro influencia na quantidade de carbono presente na atmosfera, o qual demonstra relação importante com a cobertura vegetativa, ilhas de calor e outros fenômenos ambientais (OLIVEIRA e BAPTISTA, 2015).

A urbanização aumenta a compactação do solo e quantidade de áreas impermeáveis, minimizando a infiltração e fluxo subsuperficial da água. A compactação é uma das mais sérias formas de degradação do solo em áreas urbanas, que basicamente reduz o volume de massa do solo e aumenta sua densidade (CHUI e TRINH, 2016; YANG e ZHANG, 2011).

Solos densamente compactados e áreas construídas interferem na distribuição da vegetação. Os cinturões verdes distribuídos pelas cidades são importantes pois fornecem nutrientes ao solo, mitigam os riscos de enchentes por armazenar a água infiltrada (YANG e ZHANG, 2011) e favorecem o processo de evaporação por meio da interceptação da água da chuva retida pela folhagem.

Rocha et al. (2002) mostram a relação entre o fluxo de CO₂ e a fotossíntese da vegetação. Os autores afirmam que sazonalmente a umidade do solo desempenha um papel importante: induz a formação de serapilheira, e reduz atividade fotossintética do dossel e a respiração do solo em períodos de estiagem.

Levando este padrão sazonal em consideração, infere-se ser possível verificar os níveis de sequestro de carbono a partir do estudo do comportamento da vegetação e, para tanto, é possível inclusive utilizar-se de sensoriamento remoto. As imagens

aéreas ou orbitais, com variedade multiespectral, permitem que os padrões de reflectância pelos dosséis possam ser minimamente previstos (SANO et al, 2019).

O Sensoriamento Remoto, termo cunhado no início dos anos de 1960 por Evelyn L. Pruitt e colaboradores, é uma ciência que visa a obtenção de imagens da superfície terrestre por meio da detecção e medição das interações da radiação eletromagnética (REM) com os materiais terrestres, sem que haja contato físico entre sensor e alvo. É, então, uma técnica que possibilita o estudo de recursos naturais, mapeamento e monitoramentos diversos (MENESES, 2012).

Para a detecção e monitoramento da vegetação com maior precisão, especialmente em áreas urbanas, as características espectrais e a resolução espacial das imagens são fatores importantes (GAŠPAROVIĆ et al., 2018). Em razão da alta resolução espacial das imagens Planet, os autores Gašparović e colaboradores (2018) realizaram uma fusão destas com imagens Sentinel-2 para comparar os resultados de acurácia na detecção de vegetação em Zagreb, Croácia. Os resultados mostraram maior precisão na classificação das imagens fusionadas e imagens Planetscope em relação a imagens Sentinel-2, como era esperado.

Somado a isso, a resolução temporal das imagens Planet tem alto potencial para a detecção de mudanças no uso do solo, visto que a cada 24 horas uma imagem nova é disponibilizada. Em função disso, Francini e colaboradores (2020) desenvolveram um algoritmo que alerta perturbações florestais em tempo quase real baseando-se em imagens do PlanetScope, produzindo um novo mapa com informações de mudanças na cobertura florestal assim que uma nova imagem é adquirida.

A constelação de satélites Planet também se mostra eficaz no monitoramento de lavouras e análises de topografia (AATI e AVOUAC, 2020; KOKHAN e VOSTOKOV, 2020).

A extração de informações sobre a vegetação corresponde ao registro da reflectância do dossel, que é espectralmente controlada pela fotossíntese. Na fotossíntese, a REM é absorvida em alguns comprimentos de onda e em intensidades que dependem da quantidade e da qualidade do pigmento fotossintético (SANO et al, 2019).

De acordo com Santos (2017) diversos estudos vêm contribuindo para a compreensão das relações entre a biosfera e atmosfera, enfocando a medição de

fluxos de CO₂ por meio de dados de sensoriamento remoto em diferentes ecossistemas.

A concentração de CO₂ atmosférico tem aumentado progressivamente ao longo dos anos (BAPTISTA, 2004). Para determinar o fluxo de CO₂, bem como o sequestro de carbono pela vegetação, os autores Rahman et al (2000) propuseram uma integração de índices de vegetação. Os índices de vegetação correspondem a medidas espectrais frequentemente utilizadas como protocolos de análise de variáveis bioquímicas e biofísicas por meio da matemática das bandas de interesse (SANO et al, 2019).

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (*NDVI – Normalized Difference Vegetation Index*) possibilita o mapeamento da vegetação fotossinteticamente ativa de uma área e é considerado um bom estimador de biomassa. Já o Índice de Reflectância Fotoquímica (*PRI – Photochemical Reflectance Index*) mede a eficiência do uso da luz no processo fotossintético (MARTINS e BAPTISTA, 2013). Visto isso, Rahman et al. (2000) propuseram a integração desses dois índices como forma de medir a eficiência do sequestro de carbono pelas plantas, índice chamado de CO₂flux (RAHMAN et al., 2000).

Visto que o CO₂flux é um índice espectral para investigação de sequestro de carbono, este pode ser utilizado em ampla escala para diversas determinações, como por exemplo áreas de vegetação que têm influência direta no ciclo hidrológico (TEOBALDO e BAPTISTA, 2015).

Para estudo da hidrologia, bem como para o monitoramento e atualização de informações temporais das modificações ocorridas no território, o sensoriamento remoto se apresenta como uma ferramenta bastante útil. Por meio de imagens com diferentes resoluções é possível avaliar o comportamento da vegetação, que influencia diretamente no fluxo da água entre atmosfera e superfície terrestre, afetando sua qualidade e disponibilidade para usos múltiplos em ambientes urbanos (BRITTO et al., 2019).

A capacidade de discernir objetos na superfície terrestre é limitada pela resolução espacial do sensor, o que torna a disponibilidade atual de imagens de alta resolução espacial uma oportunidade para o desenvolvimento e melhoria da pesquisa. As imagens orbitais com alta resolução espacial trouxeram inovações para as pesquisas de sensoriamento remoto. O uso desses dados permite realizar

mapeamentos e monitoramentos mais detalhados de alvos na superfície terrestre (PINHEIRO, 2003).

Há uma iniciativa bastante importante para o monitoramento do desmatamento no Brasil, o MapBiomas Alerta. A plataforma possui um sistema de validação e refinamento de alertas de desmatamento de vegetação nativa em todos os biomas brasileiros, que foi desenvolvida com imagens de alta resolução.

Todos os alertas e laudos de desmatamento são produzidos a partir da classificação supervisionada de imagens de satélites Planet. A versão atual é exclusiva para o monitoramento do desmatamento, com perspectiva de expansão para outros temas (MAPBIOMAS, 2020).

Este é um exemplo de como os produtos do sensoriamento remoto, mais especificamente imagens de alta resolução, são bastante úteis para o monitoramento de fenômenos na superfície da terra. Assim como o monitoramento do desmatamento em florestas, a dinâmica urbana também precisa ser avaliada e gerenciada, visando mitigar impactos e manter o equilíbrio ecossistêmico.

O monitoramento dos fluxos de CO₂ normalmente é realizado por meio do levantamento de dados meteorológicos. Cada vez mais o aumento da necessidade de monitorar tanto dinâmicas florestais como urbanas exige a diminuição do tempo e do custo dos procedimentos. O uso do sensoriamento remoto, aliado a dados medidos *in situ*, pode proporcionar um refinamento nos resultados relacionados ao sequestro de carbono nos ecossistemas e pode ser uma solução de menor custo aos diversos monitoramentos. (SANTOS, 2017).

Contudo, há situações em que não é possível obter os dados de campo necessários. Neste caso, Baptista (2004) utilizou e validou a aplicação do CO₂flux por meio da utilização de outro índice (inversamente proporcional), o ICO₂, validando a aplicação do CO₂flux em área de cerrado (BAPTISTA, 2004).

São diversas as aplicações de índices de vegetação para a avaliação e monitoramento das dinâmicas urbana e florestal da vegetação. O uso do CO₂flux tem se mostrado um método útil para este monitoramento por meio da avaliação dos níveis de sequestro de carbono pela vegetação.

O presente trabalho se utilizou deste índice com o objetivo de identificar, no campus Darcy Ribeiro (UnB), os elementos do ciclo hidrológico local, como forma de atestar a potencialidade das imagens Planet de alta resolução e contribuir com

resultados que validem a aplicação do CO₂flux para verificação dos níveis de sequestro de carbono pela vegetação em ambiente urbano de cerrado.

1. OBJETIVOS E HIPÓTESE

1.1 OBJETIVO GERAL

Identificar por meio de sensoriamento remoto multiespectral (dados Planet) os elementos do ciclo hidrológico – áreas de interceptação, infiltração e de geração de escoamento superficial – utilizando-se do índice CO₂flux, e avaliar as implicações da sazonalidade e variabilidade hídrica sobre esses elementos. E ainda, verificar a potencialidade das imagens Planet para a detecção do sequestro de carbono no campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília (UnB).

1.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar os elementos do ciclo hidrológico por meio da detecção da vegetação em diferentes estratos;
- Verificar a potencialidade dos dados Planet na captação da variação sazonal da vegetação (detecção do sequestro de carbono);
- Analisar o comportamento da vegetação de diferentes estratos frente a sazonalidade climática e a variabilidade do balanço hídrico;

1.2 HIPÓTESE

O sequestro de carbono é maior no período chuvoso (verão), momento em que a vegetação se encontra em plena atividade fotossintética, e menor no período seco (inverno), quando a vegetação sofre deficiência hídrica, em função dos efeitos da sazonalidade climática local.

A vegetação não sofre com a deficiência hídrica do solo de maneira uniforme – estratos vegetativos de maior porte apresentam menos sensibilidade a períodos de seca do que estratos vegetativos de menor porte. Diante disso, é possível identificar áreas componentes do ciclo hidrológico a partir da análise do sequestro sazonal do carbono pela vegetação.

A potencialidade das imagens Planet utilizadas pode ser atestada quando a resposta da vegetação ao CO₂flux e ao balanço hídrico mostra o comportamento sazonal esperado.

2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Capítulo 1: Artigo publicado na Revista Paranoá – UnB (2019). **O ESTUDO DOS COMPONENTES DO CICLO HIDROLÓGICO DESDE MÉTODOS TRADICIONAIS ATÉ O USO DE SENSORIAMENTO REMOTO: UMA REVISÃO.** Este capítulo aborda uma revisão teórica a respeito da importância da vegetação no ciclo hidrológico, bem como os principais métodos de investigação dos processos de interceptação, infiltração e geração de escoamento superficial da precipitação. Discorre também a respeito da utilização de imagens de satélite como alternativa aos métodos tradicionais de estudo no contexto da hidrologia e vegetação.

Capítulo 2: Artigo a ser submetido após a defesa à Revista GOT - Revista de Geografia e Ordenamento do Território do Centro de Estudos em Geografia e Ordenamento do Território dos Departamentos de Geografia das Universidades de Coimbra, Porto e Minho. **POTENCIALIDADE DO CO₂FLUX PARA IDENTIFICAÇÃO DOS ELEMENTOS DO CICLO HIDROLÓGICO COM DADOS PLANET.** Este artigo aborda a potencialidade de identificação dos elementos do ciclo hidrológico por meio da análise sazonal do sequestro de carbono pela vegetação no campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília (UnB).

3. REFERÊNCIAS

- AATI, Saif, AVOUAC, Jean-Philippe. Optimization of Optical Image Geometric Modeling, Application to Topography Extraction and Topographic Change Measurements Using PlanetScope and SkySat Imagery. Remote Sensing. Califórnia, USA. 2020. doi:10.3390/rs12203418.
- BAPTISTA, Gustavo M. de Mello. (2004). Mapeamento do seqüestro de carbono e de domos urbanos de CO₂ em ambientes tropicais, por meio de sensoriamento remoto hiperespectral. Geografia, 29(2), 189–202.
- BRITTO, Marcela Dupont; BAPTISTA, Gustavo M. de Mello; LIMA, Erondina Azevedo de. 2019. O estudo dos componentes do ciclo hidrológico desde métodos tradicionais até o uso de sensoriamento remoto: uma revisão. Revista Paranoá. Cadernos de Arquitetura e Urbanismo. DOI: <http://dx.doi.org/10.18830/issn.1679-0944.n23.2019.11> 127-146.
- CHUI, Ting Fong May; TRINH, Dieu Huong. Modelling infiltration enhancement in a tropical urban catchment for improved stormwater management. Hydrological Processes, [s.l.], volume v. xxx, n. xxx, p.4405-4419, 2016. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.10926>.
- FRANCINI, Saverio, MCROBERTS, Ronald E, GIANNETTI, Francesca, MENCUCCI, Marco, MARCHETTI, Marco, SCARASCIA MUGNOZZA, Giuseppe & CHIRICI, Gherardo. Near-real time forest change detection using PlanetScope imagery. European Journal of Remote Sensing. 2020. DOI: 10.1080/22797254.2020.1806734.
- GAŠPAROVIĆ, M., MEDAK, D., PILAŠ, I., JURJEVIĆ, L., BALENOVIĆ, I. Fusion Of Sentinel-2 And Planetscope Imagery For Vegetation Detection And Monitoring. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Mid-term Symposium “Innovative Sensing – From Sensors to Methods and Applications”. Karlsruhe, Germany, v. XLII-1, p. 155-160. 2018. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-1-155-2018>.
- KOKHAN, Svitlana e VOSTOKOV, Anatolii. Application of nanosatellites PlanetScope data to monitor crop growth. E3S Web of Conferences 171, 02014, 2020. Ucrânia. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017102014>.
- Lorz, C., Abbt-Braun, G., Bakker, F., Borges, P., Bořnick, H., Fortes, L., Frimmel, F. H., Gaffron, A., Hebben, N., Hořfer, R., Makeschin, F., Neder, K., Roig, L. H., Steiniger, B., Strauch, M., Walde, D., Weiß, H., Worch, E., Wummel, J. Challenges of an integrated water resource management for the Distrito Federal, Western Central Brazil: climate, land-use and water resources. Environmental Earth Sciences, 65:1575–1586. 2011. DOI: 10.1007/s12665-011-1219-1.
- MAPBIOMAS ALERTA. Disponível em <http://alerta.mapbiomas.org/>.
- MARTINS, Leandro Naveca; BAPTISTA, Gustavo Macedo de Mello. (2003). Análise Multitemporal do Sequestro Florestal de Carbono no Projeto de Assentamento Carão, Acre. Revista Brasileira de Geografia Física .V. 06, N. 06 (2013). p. 1648-1657.
- MENESES, Paulo Roberto. Princípios do Sensoriamento Remoto. In: MENESES, Paulo Roberto e ALMEIDA, Tati de. Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto: CNPq, 2012. Cap. 1. p. 1-31.

- OLIVEIRA, Marcell; BAPTISTA, Gustavo M. de Mello. Variações na Modelagem do Fluxo de CO₂ na Área Metropolitana de Brasília, por meio de Dados OLI do Landsat 8. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, 7, 2015, João Pessoa-PB. Anais...João Pessoa, Brasil. p. 323 -330.
- PIMENTA, José Antônio. (2004). Relações Hídricas. In: KERBAUY, Gilberto Barbante. Fisiologia Vegetal. Editora Guanabara Koogan S.A. Cap. 1. p. 1-39.
- PINHEIRO, S. (2003). Imagens com Alta Resolução Espacial: Novas Perspectivas Para O Sensoriamento Remoto. v. 6. n. 1. 43–64. ISSN: 1516-9375.
- RAHMAN, A., Gamon, J., Fuentes, D., Roberts, D., Prentiss, D., & Qiu, H. (2000). Modeling CO₂ flux of boreal forests using narrow-band indices from AVIRIS imagery. AVIRIS Workshop, JPL/NASA, Pasadena, California., 8p.
- ROCHA, H. R. da, Freitas, H. C., Rosolem, R., Juárez, R. I. N., Tannus, R. N., Ligo, M. A., Cabral, O. M. R., & Dias, M. A. F. S. (2002). Measurements of CO₂ exchange over a woodland savanna (Cerrado Sensu stricto) in southeast Brasil. *Biota Neotropica*, 2(1), 1–11. <https://doi.org/10.1590/s1676-06032002000100009>
- SANO, E. E., Ponzoni, F. G., BAPTISTA, G. M. M., TONIOL, A. C., GALVÃO, L. S. & ROCHA, W. J. S. F. (2019). Reflectância da Vegetação. In: MENESES, Paulo Roberto et al. Reflectância dos Materiais Terrestres. Brasília: Oficina de Textos. Cap. 6. p. 189-223.
- SANTOS, Cloves V. B. dos. Modelagem espectral para determinação de fluxo de CO₂ em áreas de caatinga preservada e em regeneração 2017. 75p. Dissertação de mestrado (Programa de Pós-Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente). Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, Bahia, Brasil, 2017.
- TEOBALDO, Débora; BAPTISTA, Gustavo M. de Mello. Quantificação da severidade das queimadas e da perda de sequestro florestal de carbono em unidades de conservação do Distrito Federal. *Revista Brasileira de Geografia Física*, Brasília, v. 1, n. 9, p.250-264. 2015. Disponível em: <www.ufpe.br/rbgfe>.

CAPÍTULO 1 – O estudo dos componentes do ciclo hidrológico desde métodos tradicionais até o uso de sensoriamento remoto: uma revisão¹

RESUMO

O crescimento populacional acelerado acarreta a ampliação de ambientes urbanos, trazendo impactos ambientais como a supressão da vegetação e aumento de áreas impermeáveis, os quais afetam diretamente a qualidade e disponibilidade da água. Sendo assim, é importante para o planejamento urbano a pesquisa e o levantamento de informações sobre os componentes do ciclo hidrológico nas cidades, a fim de possibilitar a tomada de decisão e estabelecer medidas mitigadoras de impactos presentes e futuros. Os componentes do ciclo hidrológico se dividem basicamente em áreas de interceptação da água da chuva, áreas de infiltração e áreas de escoamento superficial. Cada um deles desempenha uma função específica no ciclo da água em determinada região. Os pesquisadores se utilizam de técnicas clássicas/tradicionais ou mais recentes a depender do objetivo da pesquisa a ser desenvolvida. O presente artigo reúne e apresenta informações relevantes a respeito dos métodos utilizados para a pesquisa dessas áreas e traz o sensoriamento remoto como ferramenta útil, a qual tem a capacidade de levantar informações de forma rápida e eficaz, como alternativa de mapeamento e monitoramento dos elementos do ciclo hidrológico em ambientes urbanos.

Palavras-chave: componentes do ciclo hidrológico; sensoriamento remoto; interceptação; infiltração; escoamento superficial.

¹ Artigo publicado na Revista Paranoá (UnB) - BRITTO, Marcela; BAPTISTA, Gustavo M. De Mello; Lima, Erondina Azevedo de. Paranoá: cadernos de arquitetura e urbanismo: n. 23, p. 127-146, 2019: Em busca de autonomia e resiliência hídrica no Brasil. <https://doi.org/10.18830/issn.1679-0944.n23.2019.11>

ABSTRACT

The expansion of urban areas results in environmental impacts such as suppression of vegetation and increase of impermeable areas, which directly affect the quality and availability of water supply. Thus, it is important for urban planning activities to research and gather information about the elements of the hydrological cycle in urban areas, to understand its importance in the water cycle, in order to establish mitigating measures for present and future impacts. The components of the cycle are basically rainwater interception areas, infiltration areas and surface runoff areas. Each one of those has a specific function in the water cycle. Researchers use classic/traditional or more recent techniques depending on the purpose of the research. This article gathers and presents relevant information regarding the methods used in this field and brings remote sensing as a useful tool, which has the capability to gather information quickly and efficiently, as an alternative to mapping and monitoring the elements of the hydrological cycle in urban environments.

Key-Words: components of the hydrological cycle; remote sensing; interception; infiltration; surface runoff.

INTRODUÇÃO

O crescimento populacional e o avanço da urbanização em ambientes naturais têm acarretado impactos ambientais de diferentes naturezas (ALVES, 2015). A impermeabilização pode causar enchentes e a diminuição da qualidade da água. (THOMAS; HENDRIX; CONGALTON, 2003).

Paz (2004) exemplifica que a interceptação da água da chuva pela vegetação que ocorre em áreas de mata nativa é muito superior à de áreas agrícolas (PAZ, 2004). Por conseguinte, ao analisar impactos decorrentes da ocupação humana é importante conhecer a presença e distribuição espacial dos componentes do ciclo hidrológico, visando obter resultados que traduzam a interferência da modificação da paisagem no seu funcionamento natural.

O ciclo da água na terra é decorrente da influência da radiação solar, que faz com que seja evaporada a água dos oceanos e da superfície terrestre (TUCCI; CLARKE, 1997). Os mesmos autores afirmam que *“essa água entra no sistema de circulação geral da atmosfera, que depende das diferenças de absorção de energia (transformação em calor) e da reflectância entre os trópicos e das regiões de maior latitude, como as regiões polares (TUCCI; CLARKE, 1997)”*.

A vegetação tem um papel de importância nas trocas de energia entre atmosfera e superfície e conseqüentemente nos fluxos de volume de água, visto que a parcela inicial de precipitação é retida pela superfície da vegetação (interceptação) e, posteriormente, esse volume retido é evaporado. Quando o volume total de água retido no solo é evaporado, a planta começa a perder umidade pela transpiração e se inicia a necessidade de retirar água do solo através das raízes (TUCCI; CLARKE, 1997).

Análises do desenvolvimento urbano com a utilização de imagens de satélite, constituem-se numa ferramenta de extrema importância, isto porque permitem identificar possíveis vetores norteadores da dinâmica de ocupação e mudanças na paisagem (BIAS, 2003).

Um dos principais objetivos do sensoriamento remoto é o de distinguir entre as composições de diferentes materiais superficiais por meio de respostas espectrais e identificar diferentes tipos de vegetação, padrões de uso do solo, solo exposto, corpos hídricos, rochas e outros. Essa distinção é possível devido ao fato de os materiais superficiais terem comportamentos específicos ao longo do espectro eletromagnético,

comportamentos esses que podem, portanto, serem usados para identificá-los (CRÓSTA, 1992).

Para obter informações sobre a cobertura de áreas extensas, de maneira relativamente rápida, precisa e econômica, o sensoriamento remoto, é uma importante ferramenta no mapeamento, identificação e monitoramento de feições terrestres permitindo análises das mudanças ocorridas no uso do solo (SOUSA et. al., 2009).

Visto isso, o presente artigo de revisão tem o objetivo de apresentar o estado da arte e exemplificar alguns métodos tradicionais de estudo dos componentes do ciclo hidrológico (interceptação, infiltração e escoamento superficial), bem como evidenciar a sua importância para a compreensão do balanço hídrico em áreas urbanas. Visa, ainda, discutir a utilização do sensoriamento remoto como ferramenta para identificação e mapeamento dos componentes do ciclo por meio de técnicas de classificação e índices espectrais.

1. DESENVOLVIMENTO

1.1 Interceptação da água da chuva

1.1.1 Fatores que influenciam na interceptação da água da chuva

Interceptação da água da chuva é um processo físico protagonizado pela vegetação de qualquer ambiente (urbano ou florestal), em que a precipitação é interceptada, fracionada e distribuída pelo dossel, estratos inferiores, tronco e serrapilheira. Parte da água que fica armazenada na massa vegetal é evaporada para a atmosfera e o remanescente desce pelo tronco atingindo a serrapilheira e o solo (CALUX; THOMAZ, 2013).

A interceptação da chuva obtida pela cobertura vegetal tem fundamental participação nos processos hidrológicos, geomorfológicos e pedológicos do sistema vertente. Em decorrência da interceptação há o retardamento do processo de escoamento superficial e diminuição da força cinética das gotas de chuva, protegendo o solo contra o efeito de salpico. Influencia, ainda, a dinâmica do balanço hídrico, portanto a vegetação exerce importante função dentro do sistema hidrológico, visto que é um elemento regulador e armazenador da precipitação recebida, principalmente por meio da interceptação (THOMAZ, 2005 apud CALUX; THOMAZ, 2013).

Esse processo desempenha função importante para a manutenção do fluxo hidrológico de bacias urbanas, uma vez que reduz o impacto do montante de água pela barreira do dossel, o que impacta diretamente a também redução de picos de vazão do sistema de drenagem, dado a diminuição da quantidade de água que chega em sistemas de esgoto e leitos de rios e lagos urbanos (LIVESLEY; BAUDINETTE; GLOVER, 2014).

Além disso, a arquitetura das árvores e as propriedades dos troncos influenciam grandemente a proporção de chuvas interceptadas que se transformam no *stemflow* (fluxo do tronco) e são direcionadas para a base e para os vasos radiculares. O fluxo da água pelo tronco pode ser extremamente importante para o ciclo hidrológico e para a redistribuição de nutrientes em ambientes áridos, de agricultura, de floresta e de área urbana (LIVESLEY; BAUDINETTE; GLOVER, 2014).

Destaca-se que a maioria dos estudos de interceptação são realizados em áreas de floresta, natural ou manejada, onde é possível medi-la com mais precisão. Em ambientes urbanos o espaçamento e variabilidade entre árvores dificulta a medição, mas ainda assim pode-se esperar que a interceptação seja maior em ambientes florestais devido à cobertura de dossel contínuo (LIVESLEY; BAUDINETTE; GLOVER, 2014).

A modelagem realizada em alta resolução temporal, contribui para investigar como a interceptação influencia no tempo de concentração da bacia hidrográfica, um parâmetro importante no controle de inundações (XIAO et al., 2000). Nesse sentido, entender como diferentes características do dossel das árvores, dos traços foliares, e propriedades do caule influenciam o input de precipitação, distribuição e escoamento contribuem para a modelagem da hidrologia urbana (LIVESLEY; BAUDINETTE; GLOVER, 2014).

1.1.2 Dados coletados in-situ

A quantificação da interceptação da água da chuva se dá pela diferença entre a precipitação total e a quantidade de água que passa pelo dossel, sendo este processo influenciado pelo tipo de evento de chuva; espécie da vegetação e estrutura do dossel; e clima da região (LIVESLEY; BAUDINETTE; GLOVER, 2014).

Os autores Livesley, Baudinette e Glover (2014) realizaram um estudo para testar a aplicabilidade dos métodos de campo que se utilizam de calhas (abaixo do dossel e na base do tronco) para cálculo de interceptação, com base em 3 hipóteses:

1. Uma árvore isolada com área maior índice de área da planta leva a maior interceptação;
2. A porcentagem de água da chuva interceptada pode decair com o aumento da magnitude do evento de precipitação;
3. Uma árvore isolada com o caule liso teria maior fluxo pelo caule do que uma árvore com caule áspero, caso tivessem arquitetura e forma de ramificação similares.

A interceptação do dossel e o fluxo do tronco de uma *E. saligna* madura de tronco liso e de uma árvore de *E. Nicholii* de tronco áspero, foram medidas de forma contínua por cinco meses no campus Barnley da Universidade de Melbourne, Victoria, Austrália. (LIVESLEY; BAUDINETTE; GLOVER, 2014).

O estudo demonstra que árvores com maior índice de área foliar (densidade de dossel) interceptaram uma quantidade maior de precipitação bruta. Para um ano típico de chuvas, isso equivale a uma redução de 45% na precipitação que chega à superfície do solo (LIVESLEY; BAUDINETTE; GLOVER, 2014).

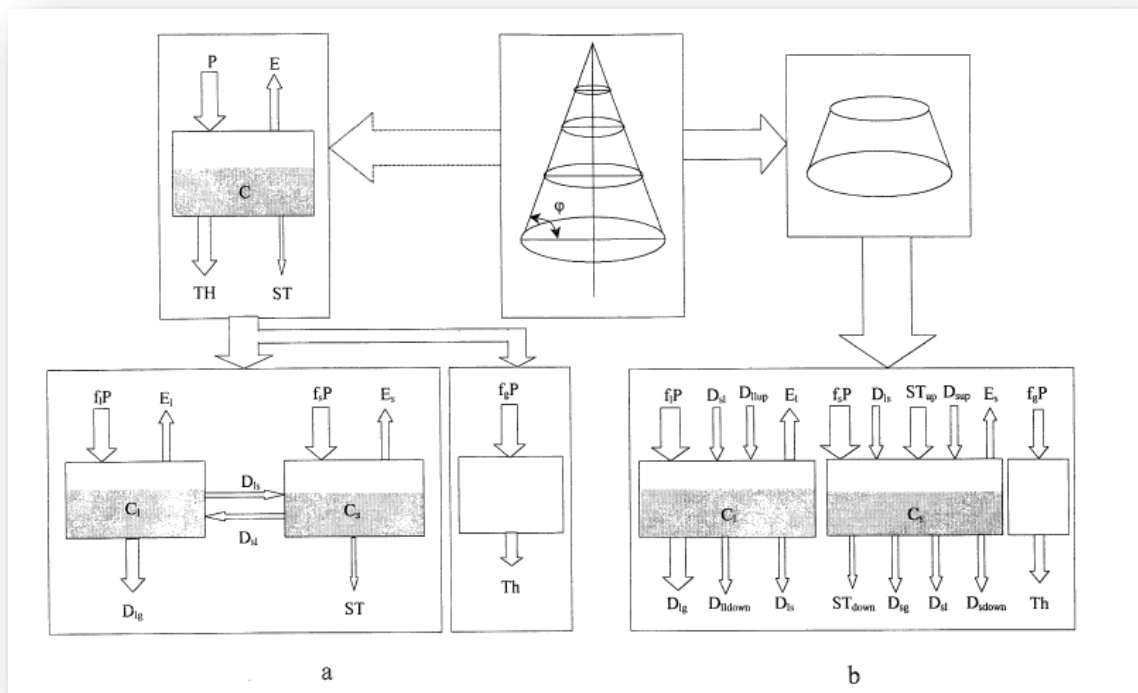
1.1.3 Alternativas de modelos para representar o processo de interceptação

O melhor entendimento das perdas por interceptação pode levar a melhoria do manejo de vegetação em ambientes urbanos. Os autores Xiao et al. (2000) desenvolveram modelo tridimensional estocástico e de base física para previsão de interceptação por árvores urbanas. O modelo leva em consideração a precipitação, dados meteorológicos e a arquitetura dos dosséis como variáveis explícitas importantes (XIAO et al., 2000).

As diferenças entre características dos dosséis das árvores, estrutura foliar e propriedades do caule influenciam o input de precipitação, sua distribuição e escoamento superficial e são de grande ajuda para a modelagem hidrológica do sistema urbano de captação de água (XIAO et al., 2000).

Os referidos autores pontuam que há diferença significativa nos processos de escoamento pelo tronco e de gotejamento pelo dossel quando se observa um único indivíduo arbóreo e quando se observa todo um dossel. A Figura 1 exemplifica o processo de interceptação nos dois casos levando em consideração o ângulo do dossel (φ), a precipitação (P), a evaporação (E), a água armazenada no dossel (C), a precipitação que atravessa diretamente a superfície foliar (TH), o fluxo de tronco (ST) e o gotejamento do dossel que atinge o solo (D).

Figura 1 – Modelo representativo da interceptação da água da chuva



Fonte: XIAO et al. (2000)

Assumindo que não há absorção de água na superfície da árvore, a precipitação que atinge o dossel é fracionada e parte é interceptada pelas folhas (f_1P), parte pelos galhos (f_2P) e parte passa direto pelas lacunas e atinge o solo (f_gP). Todos esses fatores são influenciados pelas características da planta, e por variações sazonais (XIAO et al., 2000) e/ou antrópicas e interferem no balanço hídrico local.

Ao analisar duas espécies distintas de árvores (*Pyrus calleryana* e *Quercus suber*), o estudo pôde demonstrar que a capacidade de estoque do dossel teve maior influência na interceptação e que as perdas de interceptação são mais sensíveis à área de superfície foliar (XIAO et al., 2000).

Uma desvantagem desse tipo de modelagem é que são necessários dados horários de precipitação para captar informações de chuvas rápidas e leves e as diferenças de intensidades, os quais são pontos críticos para previsão da redistribuição da chuva e do escoamento superficial (XIAO et al., 2000).

Ao analisar os resultados deve-se considerar os aspectos positivos (retenção da água da chuva) e os negativos (redução da água de recarga) da influência dos dosséis. Os benefícios são otimizados quando o dossel cobre áreas impermeáveis e os negativos aparecem quando o dossel cobre espaços verdes. O estudo conclui que

o fluxo do tronco foi menor para o tronco áspero (*E. nicholii*) quando comparado com o tronco liso (*E. saligna*). No entanto, as estimativas anuais de fluxo de caule indicam que, mesmo para a *E. saligna*, o fluxo até a superfície do solo compensaria apenas aproximadamente 10 mm dos 200 mm interceptados pelo dossel (LIVESLEY; BAUDINETTE; GLOVER, 2014).

Nesse contexto, são necessárias ferramentas de gestão que analisem como o aumento da floresta e da área permeável adjacente em meio urbano pode resultar na naturalização do ciclo hidrológico. Conceitualmente, a cobertura florestal aumenta a interceptação, os solos permeáveis e a atividade da raiz das árvores aumentam a infiltração, e a floresta e os solos permeáveis combinados aumentam a evapotranspiração (WANG; ENDRENY; NOWAK, 2008).

Em resumo, o importante papel que o fracionamento da precipitação pela vegetação pode desempenhar no balanço hídrico e, portanto, nos recursos hídricos é notório. Esse fracionamento implica na redistribuição da chuva pela vegetação, como a água que passa através do dossel, afeta o balanço hídrico em escala local e também de captação. Sendo assim, a cobertura vegetal pode ter efeitos significativos na hidrologia (LLORENS; DOMINGO, 2007).

Apesar de ser ainda mais relevante em áreas onde a água é um fator limitante do desenvolvimento econômico (LLORENS; DOMINGO, 2007), mais recentemente diversos locais com anterior abundância de água estão hoje sofrendo com a escassez devido à falta de gestão adequada tanto da vegetação, quanto dos recursos hídricos em si.

1.2 Infiltração e escoamento superficial

1.2.1 Fatores que influenciam a infiltração e o escoamento superficial

Ao atingir o solo a água da chuva pode infiltrar ou escoar superficialmente, a depender do tipo e uso do solo naquele local. A interface solo-vegetação-atmosfera exerce forte influência sob o ciclo hidrológico e, associado aos processos ecossistêmicos já naturalmente complexos, se insere nesse contexto também a ação humana (TUCCI; CLARKE, 1997).

Alterações da vegetação interferem nas propriedades do solo, refletindo nas propriedades da água dos rios, ou seja, sua presença ou ausência pode influenciar nas características da água e no ciclo hidrológico, entendimento de fundamental

importância para a sustentabilidade do ambiente. Com o objetivo e preocupação atual e recorrente de preservação desses recursos, surge a necessidade de análise das nuances específicas de cada ecossistema e análise dos principais componentes do ciclo hidrológico (BALBINOT ET. AL, 2008).

A urbanização aumenta a quantidade de áreas impermeáveis e, assim, minimiza a infiltração e fluxo subsuperficial na área de bacias hidrográficas (CHUI; TRINH, 2016). A infiltração no solo é um importante parâmetro do movimento da água, que afeta a quantidade de escoamento e o suprimento de água no solo (YANG; ZHANG, 2011).

Além das áreas construídas e pavimentadas, outras superfícies permeáveis são também frequentemente compactadas, o que torna a superfície lisa e menos porosa, prejudicando o efeito de desvio para a subsuperfície. A compactação excessiva do solo decompõe os agregados e reduz o conteúdo de água do solo devido à redução da porosidade. Tais alterações nas características do solo afetam sua função ecológica e acabam resultando em maiores riscos de inundação e degradação, pois acarretam consequências como o aumento do pico de vazão e a uma diminuição do fluxo de base dos corpos hídricos. (YANG; ZHANG, 2008. CHUI; TRINH, 2016).

Rahardjo et al. (2004) citado por CUOMO; DELLA SALA (2013) evidenciaram que o tempo de escoamento diminui com o aumento da intensidade da chuva e a taxa de infiltração diminui com o aumento da duração do evento de chuva. Os dados coletados sugerem que cerca de 40-74% da quantidade total de precipitação contribui para a infiltração, dependendo da intensidade da chuva, duração e condições de umidade antecedentes.

Os parâmetros são correlacionáveis e mostram que a infiltração e o escoamento superficial são processos dependentes entre si e que os fatores específicos de cada ambiente influenciam os dois fenômenos de maneira significativa (CUOMO; DELLA SALA (2013).

1.2.2 Métodos de investigação do comportamento da infiltração e do escoamento superficial

Os autores Cuomo, Della e Sala (2013) afirmam que uma estimativa adequada da descarga de escoamento requer necessariamente a avaliação da quantidade de precipitação que se infiltra na superfície do solo. Na literatura, existem diferentes

métodos de modelagem que podem ser divididos em dois grupos principais: empírico e físico (CUOMO; DELLA SALA, 2013).

O método Curva-Número, por exemplo, é um método empírico bem conhecido e é baseado em uma equação de balanço de massa entre a precipitação acumulada desde o início da chuva, o escoamento ocorrido e as perdas iniciais de água antes da geração de escoamento (CUOMO; DELLA SALA, 2013).

Já o método de Green-Ampt (GA) é um método de base física que considera a infiltração vertical unidimensional baseado na lei de Darcy. O método pressupõe a presença de uma fina camada contínua de água na superfície do solo provoca uma frente de escoamento que se move para baixo em um solo homogêneo com um teor inicial uniforme de água (CUOMO; DELLA SALA, 2013). A Lei de Darcy basicamente traduz a resposta de um aquífero ao bombeamento por meio de um poço, explica o fluxo de um fluido através de um meio poroso (CABRAL, 2000).

Ambas as classes de métodos têm limitações importantes. Por exemplo, o método CN não considera explicitamente as propriedades hidráulicas de um solo insaturado/saturado enquanto investiga o efeito do ângulo de inclinação; por outro lado, o método modificado de Green-Ampt (MEIN e LARSON, 1973) permite considerar propriedades de solo mensuráveis como a condutividade hidráulica saturada do solo e o teor de umidade inicial, mas se refere a um padrão de infiltração vertical unidimensional que não é o caso geral da infiltração de água em uma encosta. Portanto, diferentes simplificações evitam que ambos os métodos simulem adequadamente os processos de infiltração e escoamento (CUOMO; DELLA SALA, 2013).

Em geral, a dispersão de dados é um ponto fraco deste tipo de abordagem, especialmente para propósitos de projeções, e está principalmente relacionado a: condições *in situ* variáveis; diferentes resoluções temporais dos dados; e diferentes mecanismos que governam os movimentos de massa do solo (CUOMO; DELLA SALA, 2013).

Yang e Zhang (2011) realizaram em Nanjing (China) um estudo se utilizando de trinta locais representativos que pertencem a quatro tipos de zonas funcionais urbanas, definidos como uma área especial para atividades humanas, tais como áreas residenciais, áreas de parque, cinturão verde e estradas. Esses locais foram reagrupados em dez padrões de acordo com zonas funcionais urbanas, tipos de vegetação e tempo de uso da terra. Foram colhidas três amostras de solo de cada

sítio a ser analisado. Visto que a compactação do solo ocorre na camada superficial, as amostras foram coletadas em uma profundidade de até 10 cm (YANG; ZHANG, 2011).

A taxa inicial de infiltração foi obtida no primeiro minuto de avaliação. Alternativamente, a taxa final de infiltração foi registrada quando a taxa de infiltração se estabilizou ao longo do tempo (YANG; ZHANG, 2011).

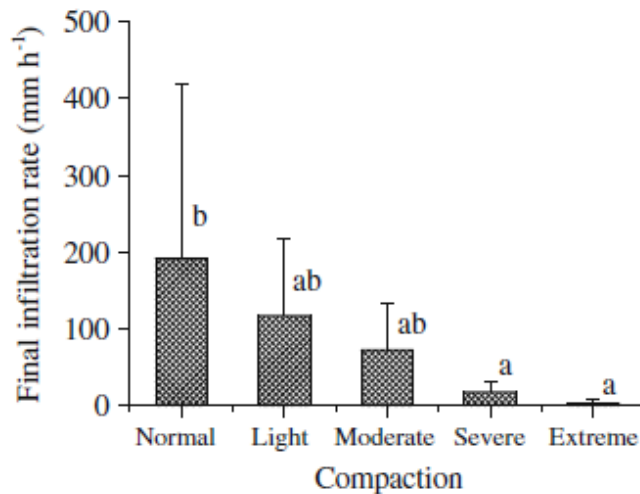
Geralmente, o escoamento superficial ocorre apenas quando a intensidade da chuva é maior que a capacidade de infiltração. O coeficiente de escoamento foi calculado de acordo com as equações, em que R_i é a profundidade do escoamento superficial (mm), K_i é a intensidade do evento de chuva (com intensidade maior do que a capacidade de infiltração), K_s é a infiltração final, t é a duração do evento de chuva (h), a_i é o coeficiente de escoamento superficial (%) e P_i a precipitação total (mm) (YANG; ZHANG, 2011):

$$R_i = (K_i - K_s) \times t \quad (1)$$

$$a_i = \frac{R_i}{P_i} \times 100 \quad (2)$$

Coeficiente de Pearson foi utilizado para obter a correlação entre as taxas de infiltração e outras propriedades físicas e químicas do solo. As taxas de infiltração inicial e final foram correlacionadas com a densidade do solo, porosidade total, porosidade preenchida, porosidade capilar e teor de matéria orgânica, areia, silte e argila (YANG; ZHANG, 2011). Grandes variações nas taxas finais de infiltração foram observadas em padrões idênticos de uso da terra, porém a taxa de infiltração do solo sempre diminuiu com o aumento da densidade e diminuição da porosidade (YANG; ZHANG, 2011).

Gráfico 1 – Comparativo entre níveis de compactação do solo e taxa de infiltração final



Fonte: YANG; ZHANG (2011)

O Gráfico 1 acima ilustra a comparação entre taxa de infiltração final e a compactação do solo. É possível notar que a taxa final de infiltração diminuiu com o aumento do grau de compactação do solo. Além disso, a taxa final de infiltração do solo não compactado (normal) foi significativamente diferente daquela dos solos severamente e extremamente compactados (YANG; ZHANG, 2011).

Os resultados mostraram que a taxa de infiltração diminuiu com o aumento da densidade superficial do solo e conseqüente redução da sua porosidade, chegando a conclusão de que a presença de macroporos aumenta a taxa de infiltração e reduz o escoamento superficial (YANG; ZHANG, 2011).

Os autores Yang e Zhang (2011) explicam que no início da infiltração, o solo está seco e a água se move rapidamente pela gravidade e matriz de sucção. No entanto, à medida que a infiltração avança, a força da matriz de sucção diminui gradualmente e a umidade do solo aumenta. Como resultado, a taxa de infiltração diminui gradualmente. Quando a matriz de sucção é próxima de zero, a água se move apenas por gravidade e a taxa de infiltração se estabiliza com o tempo (YANG; ZHANG, 2011).

De maneira complementar, Zhang, Jiao e Yang (2000) observaram que a taxa de infiltração depende do teor de água inicial do solo e que a presença de descontinuidades estratigráficas pode influenciar o padrão de infiltração, em estudo realizado na província de Hubei (China) (ZHANG; JIAO; YANG, 2000).

Além disso, a qualidade da água de escoamento superficial foi baixa durante os eventos de inundação estudados. Portanto, a baixa taxa de infiltração, devido à compactação do solo, afeta negativamente o ambiente ecológico urbano, aumenta a taxa de enchentes instantâneas e degrada a qualidade da água superficial (YANG; ZHANG, 2011).

A fim de mitigar as mudanças nos regimes hidrológicos em áreas urbanas, uma nova abordagem de manejo de água pluviais, chamada de desenvolvimento de baixo impacto, vem sendo adotada nas últimas décadas (CHUI; TRINH, 2016).

A ideia geral é implementar controles hidrológicos descentralizados em pequena escala ao longo do território de uma bacia para replicar o regime hidrológico. Os gramados urbanos são um exemplo de unidade de controle hidrológico que foca em aumentar a capacidade de infiltração (CHUI; TRINH, 2016) e é o mais comum de se ver em áreas urbanizadas.

No contexto de áreas urbanas, é interessante ressaltar que a cobertura de grama reduz significativamente o escoamento, sendo necessária uma pequena modificação da estrutura microtopográfica para verificar um efeito significativo no processo de escoamento superficial (DARBOUX et al., 2002. PAN; SHANGGUAN, 2006).

Essas estruturas baseadas em infiltração, reintroduzem o "desvio" da subsuperfície e, portanto, reduzem o escoamento superficial e influenciam a recarga do armazenamento subterrâneo, o que contribui para a manutenção dos fluxos de base (CHUI; TRINH, 2016).

Para entender melhor os processos de infiltração transitória e mais especificamente as taxas de infiltração em diferentes cenários, simulações de infiltração unidimensionais foram realizadas por Chui e Trinh (2016) utilizando um solucionador genérico de equações diferenciais parciais em Cingapura, por meio de um estudo de caso da bacia de Marina para examinar a infiltração em grande escala e a viabilidade de restaurar a infiltração com um planejamento em nível de captação usando simulação numérica. O estudo de caso adota modelo digital de elevação (MDE), cobertura do solo e mapa do solo. O modelo é calibrado usando o nível de água perto da saída da captação, medido pela agência nacional de água de Cingapura em abril de 2014 (CHUI; TRINH, 2016).

As taxas de infiltração são calculadas em diferentes cenários representando várias condições: intensidade de chuva constante, diferentes propriedades do solo e eventos de chuva representativos (CHUI; TRINH, 2016).

Foi possível observar que o volume de infiltração é maior para chuvas com intensidade mais alta e constante. No entanto, se forem considerados eventos pluviométricos com as mesmas profundidades de precipitação, a fração de precipitação que infiltra é, na verdade, menor para os de maior intensidade e menor duração (CHUI; TRINH, 2016).

Esses processos confirmam os resultados da análise de dados de campo e simulações em escala local baseadas em eventos de chuva. Por exemplo, a taxa de infiltração é influenciada pela condutividade hidráulica e intensidade da chuva, conteúdo de umidade do solo e o intervalo de tempo entre os eventos de precipitação. (CHUI; TRINH, 2016).

Bryan e Rockwell (1998), em estudo realizado em Toronto se utilizando de amostras de solo de composição areia/argila, mostraram que o tempo médio de escoamento (tempo decorrido entre o início da chuva e a geração de escoamento) diminui quando os ângulos de inclinação aumentam.

1.3 Sensoriamento Remoto

1.3.1 Histórico das imagens de sensoriamento remoto

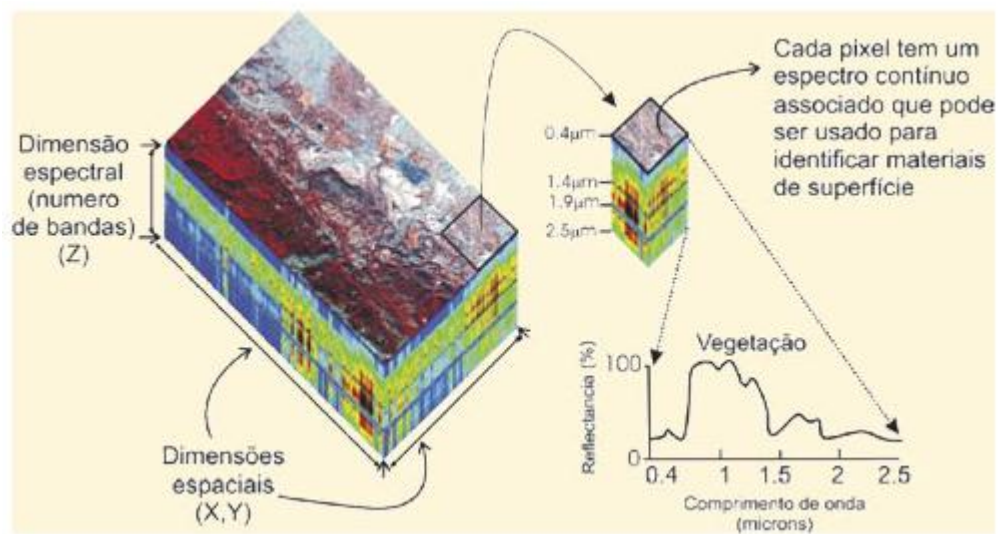
O termo sensoriamento remoto foi cunhado em 1960 por Pruit e colaboradores. É uma tecnologia altamente bem-sucedida para coleta automática de dados de monitoração dos recursos terrestres em escala global.

A resolução espectral de imagens obtidas por sensoriamento remoto hoje já ultrapassa centenas de bandas, o que possibilita sua aplicação nas mais diversas áreas como monitoração ambiental, detecção de desastres, defesa, vigilância etc (MENESES, 2012).

Avanços notáveis ocorreram nas últimas décadas na tecnologia de sensores, que resultaram em espectrorradiômetros capazes de adquirir medidas em campo ou laboratório com alta resolução, e o mesmo vem acontecendo com sensores a bordo de aeronaves (GALVÃO, 2019). A resposta espectral dos materiais pode ser medida a partir do espaço com sensores imageadores a bordo de satélites.

Há algumas formas de obtenção de imagens a partir da resposta espectral da Terra. Uma delas é a utilização de sensores multiespectrais que possuem um pequeno número de bandas largas (dezenas a centenas de nm de largura) estrategicamente posicionadas em janelas atmosféricas ao longo do espectro eletromagnético; a outra é a utilização de sensores hiperespectrais, os quais têm um grande número de bandas estreitas (>15 nm de largura), posicionadas sequencialmente em intervalos espectrais regulares, ao longo de uma determinada faixa espectral (MENESES, 2012).

Figura 2 – Representação do modelo hiperespectral



Fonte: SOUZA FILHO (2004)

Para exemplificar o conceito de sensoriamento remoto hiperespectral pode-se utilizar um cubo de dimensões x, y e z, sendo x e y as linhas e colunas da imagem e z a representação das bandas do sensor de acordo com os seus comprimentos de onda (GALVÃO, 2019).

Na Figura 2 observa-se os espectros de reflectância que ilustram o comportamento de vários materiais presentes numa área urbana. O gráfico mostra o comportamento espectral da vegetação para um comprimento de onda específico. Comportamentos espectrais de outros materiais podem ser similares e distintos ao longo do espectro eletromagnético – ou seja, cada material tem uma assinatura espectral característica, que serve para distingui-los e caracterizá-los (SOUZA FILHO, 2004).

Comparado ao sensoriamento remoto multiespectral, o hiperespectral permite reconhecer nas cenas, por exemplo, componentes bioquímicos da vegetação, como

a clorofila, água foliar, lignina e celulose (GALVÃO, 2019) o que permite a diferenciação entre espectros de vegetação sadia e espectros de vegetação senil.

Imagens com grande resolução espacial são úteis quando o objetivo é estudar o local em detalhe e imagens com pequena resolução espacial são melhores ao estudar áreas maiores, em escala regional, por exemplo. A identificação do alvo em imagens de sensoriamento remoto é determinada por quatro diferentes medições: 1) Resolução espacial – campo de visada do sensor; 2) Resolução espectral – comprimento de onda das bandas; 3) Resolução radiométrica – medida de radiância do alvo; e 4) Resolução temporal – data de obtenção da imagem e tempo de revisita. Todas essas formas de medição atuam em conjunto em um processo iterativo e devem ser levadas em conta integradamente pelo analista de forma a se obter um entendimento completo sobre os motivos pelos quais alguns objetos são identificados nas imagens (MENESES, 2012).

1.3.2 Uso do sensoriamento remoto para estudo da vegetação e hidrologia

O sensoriamento remoto tem se desenvolvido rapidamente nos últimos 20 anos. O sensoriamento remoto do ciclo da água, que é a fronteira da pesquisa interdisciplinar entre sensoriamento remoto e a hidrologia, tem como objetivos: estudar a teoria, metodologia e tecnologia de aquisição de componentes hidrológicos via sensoriamento remoto; e combinação de sensoriamento remoto e aplicação de modelos hidrológicos (CUI et al., 2018).

Pesquisas sobre o ciclo da água em escalas global e regional envolvem os elementos de hidrologia e meteorologia, incluindo precipitação, evapotranspiração, escoamento, umidade do solo e armazenamento total de água em várias resoluções espaço-temporais. Esses elementos têm efeitos profundos na sociedade humana e nos ecossistemas naturais em muitos aspectos. Tais informações podem ser extraídas, simuladas e recuperadas usando técnicas de sensoriamento remoto (TANG et al., 2016. CUI et al., 2018).

Embora os pluviômetros e os radares terrestres meçam a precipitação diretamente com precisão relativamente alta, eles sofrem limitações inerentes, como distribuição e cobertura espacial limitada. Portanto, o sensoriamento remoto via satélite é uma forma prática de obter observações abrangentes de precipitação global (CUI et al., 2018).

Diversas técnicas têm sido utilizadas com sucesso para fins de mapeamento urbano no campo do sensoriamento remoto, como metodologias tradicionais de classificação (supervisionadas e/ou não supervisionadas), índices espectrais e suas derivações, integração de sensoriamento remoto e SIG, análise de paisagem em escala múltipla e modelos conceituais da superfície do solo, os quais estão entre os trabalhos mais importantes na literatura com foco no monitoramento da expansão urbana (VILLA, 2012).

A interpretação de imagens de uma única data apresenta dificuldades para alvos que possuem marcada sazonalidade climática, pois suas reflectâncias mudam no decorrer do ano. Esse é o caso, por exemplo, dos biomas Cerrado e Caatinga. No Cerrado a distribuição da precipitação ao longo dos meses é bastante irregular: seis meses de chuva e seis meses de seca, sendo comum não haver precipitação nenhuma em julho e agosto. Um mesmo alvo pode apresentar características espectrais diferentes em imagens obtidas em datas distintas ao longo do ano (SANO; BORGES, 2019).

1.3.3 Classificação de imagens de satélite

No passado, a classificação de imagens automatizada se baseava quase que exclusivamente em classificar cada pixel pela intensidade de cor, negligenciando características importantes de textura, forma, localização e contexto (SHARMA; SARKAR, 1998). Imagens de alta resolução permitem o mapeamento de objetos individuais e contêm mais informação espectral. A classificação deve ser exaustiva, mutuamente exclusiva e hierarquizada. A estratégia de classificação deve ter classes (vegetação, água, solo exposto) e regras que definam como encaixar as áreas definidas em cada classe (THOMAS; HENDRIX; CONGALTON, 2003. CONGALTON; GREEN, 2008).

Thomas, Hendrix e Congalton (2003) se utilizaram da classificação de áreas divididas em 2 grupos: áreas permeáveis e áreas impermeáveis. Uma abordagem de amostragem aleatória estratificada foi escolhida para garantir que as classes de cobertura da terra que ocorrem em frequências mais baixas, especialmente as características da água, foram adequadamente amostradas. Este objetivo foi alcançado selecionando um número mínimo de pontos em cada classe de uma classificação não supervisionada das imagens geradas usando o algoritmo ISODATA.

De acordo com Martins (2012), o método de classificação ISODATA é provavelmente o mais conhecido. O método identifica padrões típicos nos níveis de cinza, os quais são classificados efetuando-se o reconhecimento de alguns parâmetros escolhidos para determinar a sua interpretação.

Nesse mesmo estudo, uma comparação das diferentes matrizes mostra que o mapeamento de dados de alta resolução usando informações puramente espectrais resultou em precisões de mapas relativamente baixas, representando uma desvantagem. No entanto, a classe "vegetação" alcançou alta precisão (90%) usando métodos de classificação espectral. O sucesso desta classe é devido à vegetação paisagística, como campos de golfe, que são espectralmente distintos do ambiente circundante, o que acontece com alguma frequência em áreas urbanas (THOMAS; HENDRIX; CONGALTON, 2003).

Existem alguns tipos de confusão difíceis de mapear. O paisagismo no deserto, por exemplo, geralmente consiste em cascalho, e certos tipos de cascalho podem ser espectralmente indistinguíveis do pavimento. Para tornar a confusão ainda mais complexa, uma camada de areia carregada pelo vento pode cobrir áreas pavimentadas (THOMAS; HENDRIX; CONGALTON, 2003).

Fotos ortorretificadas e o conhecimento da área de estudo são essenciais para fazer essas distinções com base em pistas de identificação visual. A técnica de classificação mais bem-sucedida para analisar essas distinções finas foi o método de modelagem espacial usando forma, textura, proximidade e contexto para resolver a confusão espectral (THOMAS; HENDRIX; CONGALTON, 2003).

O mapeamento automatizado de imagens de alta resolução requer uma nova abordagem. Com as novas fontes de imagem, até mesmo objetos individuais podem ser compostos de muitas características espectrais diferentes.

Por exemplo, uma árvore pode ter o dossel composto por diferentes pixels em uma resolução de 1m (THOMAS; HENDRIX; CONGALTON, 2003).

A segmentação de imagens permite integração de informações espectrais e contextuais, que identifica unidades de mapa homogêneo, em vez de pixels individuais (THOMAS; HENDRIX; CONGALTON, 2003).

A existência de pixel mistura é uma fonte de incerteza inevitável para estimar a perda de interceptação usando observações de sensoriamento remoto, por exemplo. Um método alternativo é usar imagens de alta resolução espacial para reduzir os efeitos de mistura de pixels (CUI; JIA; HU, 2015).

1.3.4 Monitoramento por Índices de vegetação

A infraestrutura verde de áreas urbanas é muito importante para a manutenção da qualidade de vida nas cidades. Isso desencadeia a busca por uma ligação mais robusta entre a condição da infraestrutura verde urbana e sua capacidade de suprir os serviços ecossistêmicos. Entender a condição da infraestrutura verde em ambientes urbanos fornece informação necessária à tomada de decisão de investimentos na área (DIMITROV et al., 2018).

O sensoriamento remoto oferece oportunidade para monitoramento da variabilidade espaço-temporal usando insumos básicos como a transformação e combinação da reflectância espectral da cobertura vegetal em índices de vegetação. Os que são mais utilizados empregam a informação contida nas reflectâncias de dosséis referentes às regiões do vermelho e do infravermelho próximo (MARTINS, 2012. CUI et al., 2018).

Tais índices têm a função de realçar o comportamento espectral da vegetação, correlacionando-se com seus parâmetros biofísicos em um modelo que explicita o comportamento sazonal. Incluem também elevados graus de correlação com o vigor da vegetação verde, porcentagem de cobertura do solo e a atividade fotossintética (MARTINS, 2012).

Dentre os índices de vegetação comumente citados na literatura o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) é o mais amplamente utilizado. Séries multitemporais de seus valores têm sido utilizadas em vários trabalhos para auxiliar a identificação e classificação de vegetação terrestre, caracterizar a dinâmica da vegetação, estimar precipitação, gerar alertas de secas e desenvolver modelos de previsão climática (GONÇALVES, 2008).

O NDVI expressa a diferença de reflectância entre a feição de absorção do vermelho (660 nm) e o aumento de albedo que ocorre nos espectros de vegetação após o início do infravermelho próximo (800 nm) (BAPTISTA, 2004).

Os valores de NDVI variam de -1 a +1, sendo que valores negativos correspondem a alvos sem cobertura vegetal e valores positivos a alvos com cobertura vegetal verde e densa. Este índice é sensível a variações de biomassa verde, conteúdo de clorofila e estresse hídrico, possuindo alta correlação com a banda espectral do vermelho (SANO et al., 2019).

O índice é muito útil no exame da vitalidade das plantas, capturando a quantidade de luz que está sendo absorvida e refletida por elas e pela disponibilidade

de clorofila. Tipicamente a vegetação verde tem valores entre 0,3 e 1. Em geral, se houver muito mais radiação refletida em comprimentos de onda próximos ao infravermelho do que em comprimentos de onda visíveis, é provável que a vegetação traduzida nesse pixel seja densa (DIMITROV et al., 2018).

Os autores Dimitrov et al. (2018) realizaram um estudo em algumas áreas verdes urbanas em Karlovo (Bulgária) para apresentar uma abordagem integrada na avaliação da condição da infraestrutura verde urbana por observação in-situ e sensoriamento remoto.

A pesquisa de vegetação urbana em Karlovo (Bulgária) demonstrou que a vitalidade da vegetação captada pelo NDVI corresponde totalmente com os resultados obtidos em campo (DIMITROV et al., 2018).

Outro índice existente é o SAVI (*Soil-Adjusted Vegetation Index*), que é ajustado para efeitos do solo. O SAVI foi baseado na inserção de uma constante L na equação do NDVI, que corresponde a 0.5 da vegetação esparsa. Quando a influência do solo é mínima, em regiões de vegetação densa, o valor de L tende a 0 (SANO et al., 2019. HUETE, 1988).

O SAVI possui alguns índices derivados: SAVI transformado, SAVI modificado e SAVI otimizado. Há também o ARVI (*Atmospherically Resistant Vegetation Index*), utilizado para atenuação do espalhamento da radiação na atmosfera (SANO et al., 2019).

Villa (2012) desenvolveu um estudo de técnicas de detecção de mudanças para análises de crescimento urbano que explora índices espectrais em razão de sua simplicidade e pronto uso, bem como sua confiabilidade. A área escolhida foi a região metropolitana de Milão, Itália, e foram descritas mudanças na ocupação do solo em escala regional/local se utilizando de imagens multiespectrais (VILLA, 2012).

O autor de utiliza do SVI (*Soil and Vegetation Index*) para discriminar área urbana e área não urbana e as mudanças ocorridas em um período de tempo. O SVI é um índice espectral baseado na resposta espectral dos alvos no que corresponde a faixa do infravermelho de ondas curtas (SWIR) e tem demonstrado excelentes performances em discriminar superfícies impermeáveis (relacionadas a classes de características de urbanização) de superfícies não-impermeáveis em trabalhos científicos publicados anteriormente (VILLA, 2012).

A abordagem metodológica apresentada demonstrou boa capacidade de discriminação para o mapeamento de evolução de áreas urbanas usando dados de

sistemas sensores capazes de mapear áreas construídas de vários tamanhos (VILLA, 2012), ou seja, em diferentes escalas (local, regional, global).

Visto a interferência dos efeitos de solo e da atmosfera nos espectros da vegetação, surgiu a necessidade de se desenvolver outro índice de vegetação que atenuasse esses efeitos. Em 2002 foi criado o EVI (*Enhanced Vegetation Index*), que atenua os dois efeitos simultaneamente por meio da incorporação de uma constante L e de uma banda do azul. (SANO et al., 2019. HUETE et al., 2002).

O dióxido de carbono - CO₂ tem sua importância associada ao efeito estufa, por meio do qual é mais comumente conhecido. Entretanto, é importante também para o processo de fotossíntese e sua concentração tem aumentado nos últimos anos (BAPTISTA, 2004).

O CO₂-flux (RAHMAN et al., 2000) é um índice que mede o sequestro florestal de carbono pela vegetação fotossinteticamente ativa. Ele é obtido por meio da integração dos índices de vegetação NDVI e PRI, dois índices espectrais do tipo “diferença normalizada” (BAPTISTA, 2004. TEOBALDO; BAPTISTA, 2015). Estudos mostram que o PRI pode ser correlacionado com as taxas de fotossíntese e o NDVI com o sequestro de carbono. Isso ocorre porque quanto maior for a atividade fotossintética, maior serão as feições de absorção nas faixas do azul e do vermelho (BAPTISTA, 2004).

O PRI é o índice de reflectância fotoquímica (*Photochemical Reflectance Index*) (GAMON; SERRANO; SURFUS, 1997) e é especialmente sensível a mudanças no pigmento xantofila e, portanto, à eficiência do uso da luz (KOOISTRA et al., 2008).

Como o PRI é um índice normalizado e seu valor pode, teoricamente, variar de -1 a +1, sendo necessário transformá-lo em um termo de 'eficiência' por uma manipulação algébrica simples de adicionar 1 a cada valor PRI e dividir o resultado por 2. Esse PRI reescalonado (sPRI) tem valores em um intervalo de 0 a 1 (RAHMAN et al., 2004). A multiplicação do valor do NDVI e o valor reescalonado de PRI resulta no CO₂flux, conforme a fórmula a seguir:

$$CO_2flux = NDVI \times sPRI$$

Um estudo desenvolvido por Teobaldo e Baptista (2015) foi realizado com o objetivo de determinar a correlação entre severidade de queimada e sequestro de carbono, por meio da determinação do CO₂flux antes e depois da queimada e no momento da rebrota. Visto que o CO₂flux é um índice espectral para investigação de sequestro de carbono, este pode ser utilizado em ampla escala para outras

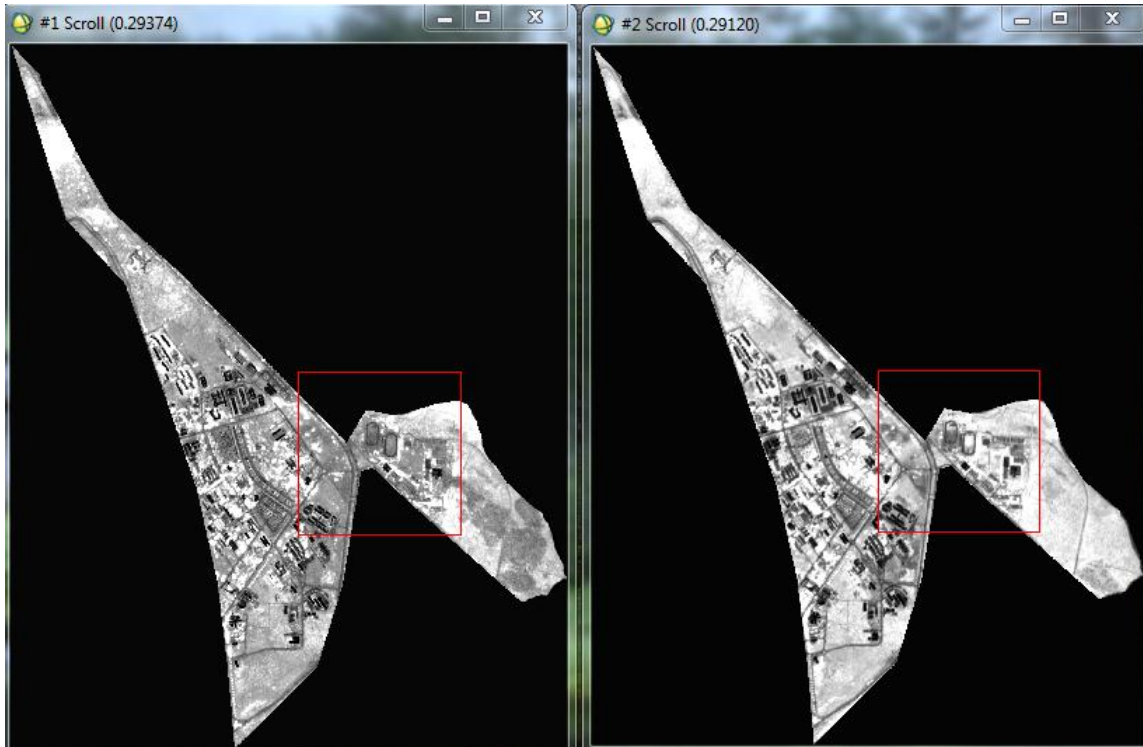
determinações, como por exemplo áreas de vegetação que têm influência direta no ciclo hidrológico local (TEOBALDO; BAPTISTA, 2015).

A Figura 3 é composta por duas imagens da Universidade de Brasília (UnB) – Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília, DF e ilustra a utilização do CO₂flux como ferramenta de análise da vegetação em diferentes períodos do ano. À esquerda está a imagem obtida em agosto de 2018 e à direita em dezembro de 2018. Os maiores valores traduzem a maior presença de vegetação fotossinteticamente ativa em tons mais claros de cinza. Já os menores valores, ao contrário, áreas sem vegetação, como áreas pavimentadas, edificadas ou de solo exposto, em tons mais escuros de cinza.

O Cerrado, bioma onde a UnB está inserida, apresenta grande contraste sazonal entre a estação seca e a estação chuvosa. A marcante sazonalidade climática exerce forte influência na fenologia da vegetação, algumas fisionomias perdem total ou parcialmente as folhas na estação seca e ocorre a produção de novas folhas, aumento da biomassa e ativação dos processos metabólicos na estação chuvosa (RATTER ET AL., 1997. SOUZA; GURGEL; CIAMP, 2016).

Nesse contexto, é possível perceber tons de cinza mais claros predominantes na imagem tomada em dezembro, pois é um período chuvoso em que a vegetação se encontra com mais vigor. Enquanto tons mais escuros de cinza, que representam áreas construídas e impermeabilizadas, não possuem variação expressiva de uma imagem para outra.

Figura 3 – Aplicação do CO2flux em imagem da Universidade de Brasília



1.3.5 Sensoriamento Remoto em áreas urbanas

A cobertura superficial impermeável foi identificada como um indicador chave no contexto de desenvolvimento urbano e informações detalhadas sobre o tipo, densidade, configuração e conectividade de superfícies impermeáveis são necessárias para descrever as condições biológicas em uma bacia hidrográfica ou para servir como insumo para modelos ambientais (LINDEN; HOSTERT, 2009. ARNOLD; GIBBONS, 1996. ALBERTI et al., 2007).

Utilizando-se de maneira mais aprofundada do componente de área impermeável, determinar a relação do território com as áreas adjacentes, no sentido de determinar quanto da água da chuva em uma determinada superfície realmente foi transportada para um sistema de captação ou leito de corpos d'água, são informações espacialmente explícitas sobre superfícies impermeáveis e cobertura de solo urbano que servem para derivar o uso do solo como variável de entrada funcional para aplicações ecológicas urbanas (ARNOLD; GIBBONS, 1996. LINDEN; HOSTERT, 2009)

Por exemplo, em geral telhados drenam a água para jardins, gramados ou outras áreas permeáveis, então causam menos impacto que rodovias, as quais

encaminham o escoamento diretamente para o sistema de captação pluvial (ARNOLD; GIBBONS, 1996).

Para medir e se utilizar da cobertura impermeável como ferramenta de proteção aos recursos hídricos é necessário saber como a impermeabilidade de um determinado local é distribuída. Para obter maior refinamento, a área impermeável pode ser detalhada por categorias de uso do solo descrevendo as respectivas funções e os impactos de cada uma no escoamento superficial e nesse sentido o sensoriamento é uma ferramenta útil para fornecer informações espacialmente explícitas em áreas urbanas (ARNOLD; GIBBONS, 1996. LINDEN; HOSTERT, 2009).

Deve-se considerar diferentes tipos de resolução temporal ao monitorar ambientes urbanos usando dados de sensoriamento remoto. Os fenômenos urbanos que progridem através de um ciclo de desenvolvimento são identificáveis, da mesma forma que a vegetação progride através de um ciclo fenológico. Dados atualizados de sensores remotos são chave para a maioria das aplicações urbanas (JENSEN; COWEN, 1999).

Uma descrição detalhada dos três principais elementos da heterogeneidade urbana - vegetação, estruturas construídas e materiais de superfície - é necessária para facilitar uma compreensão mais profunda das relações no sistema urbano humano natural acoplado (CADENASSO; PICKETT; SCHWARZ, 2007) e relevante para a maioria dos estudos em ambientes urbanos (LINDEN; HOSTERT, 2009)

Algumas classificações indicam intensidade de uso residencial, referindo-se à densidade de edifícios. Tal categorização, tacitamente pressupõe que todas as áreas residenciais são equivalentes. No entanto, as variações desses elementos podem influenciar o fluxo de água, nutrientes e energia (CADENASSO; PICKETT; SCHWARZ, 2007).

Os autores Cadenasso, Pickett e Schwarz (2007) apresentam uma classificação de uso e ocupação do solo que explica a natureza complexa dos sistemas urbanos. Essa classificação refina a caracterização dos componentes ecológicos da paisagem urbana por meio da divisão dos elementos em: vegetação de textura grossa (árvores e arbustos); vegetação de textura fina (gramados e gramíneas); solo exposto e pavimento; área edificada; e tipologia da área edificada.

O tipo de vegetação, o material de superfície e os edifícios influenciam na função desempenhada pelo ecossistema, devido à sua contribuição diferenciada na distribuição de materiais e energia. Os autores afirmam que destrinchar a estrutura

urbana a partir das variáveis funcionais de uso e ocupação do solo pode melhorar a capacidade de testar hipóteses sobre a relação entre estrutura urbana e os serviços ecossistêmicos (funções ecológicas) fornecidos pelo meio (CADENASSO; PICKETT; SCHWARZ, 2007).

2. CONCLUSÃO

Para estudo da hidrologia, bem como seu monitoramento e atualização de informações temporais das modificações ocorridas no território, o sensoriamento remoto se apresenta como uma ferramenta bastante útil e com capacidade temporal e espacial satisfatórias a obtenção de dados. Por meio de imagens com diferentes variações espectrais é possível verificar o comportamento da vegetação que, como visto anteriormente, influencia diretamente no fluxo da água entre atmosfera e superfície terrestre, afetando sua qualidade e disponibilidade para usos múltiplos em ambientes urbanos.

A escolha do método de estudo está diretamente relacionada com o objetivo da pesquisa e com os resultados que se deseja obter. É muito comum e extremamente válida a combinação de mais de uma técnica para se obter resultados completos. A integração de métodos de estudo, tradicionais e medidas em campo, com dados de sensoriamento remoto é uma alternativa que serve para completar lacunas existentes em ambas as técnicas.

O artigo fornece subsídio teórico sobre a importância do conhecimento dos elementos do ciclo hidrológico para o balanço hídrico geral e disponibilidade hídrica em ambientes urbanos, apresentando as formas mais comuns de estudo dessas áreas, bem como traz o sensoriamento remoto como ferramenta alternativa para este tipo de estudo.

Os conhecimentos aqui disponibilizados podem contribuir para estudos com o objetivo de identificar, classificar e descrever a presença dos componentes do ciclo hidrológico, visto que cada um deles possui sua influência no ciclo geral da água, bem como suas modificações sazonais, por meio do processamento digital de imagens obtidas pelos mais diversos sensores orbitais disponíveis.

3. REFERÊNCIAS

- ALBERTI, Marina et al. The impact of urban patterns on aquatic ecosystems: An empirical analysis in Puget lowland sub-basins. *Landscape and Urban Planning*, [s.l.], v. 80, n. 4, p.345-361, maio 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2006.08.001>.
- ALVES, Patrícia Layne. CAPACIDADE DE INTERCEPTAÇÃO PELAS ÁRVORES E SUAS INFLUÊNCIAS NO ESCOAMENTO SUPERFICIAL URBANO. 2015. 110 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências Ambientais, Estrutura e Dinâmica Ambiental, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.
- ASSOULINE, S.; BEN-HUR, M. Effects of rainfall intensity and slope gradient on the dynamics of interrill erosion during soil surface sealing. *Catena*, [s.l.], v. 66, n. 3, p.211-220, jun. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2006.02.005>.
- BALBINOT, Rafaelo et al. O papel da floresta no ciclo hidrológico em bacias hidrográficas. *Ambiência - Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais*, Guarapuava, Pr, v. 4, n. 1, p.131-149, abr. 2008.
- BAPTISTA, Gustavo Macedo de Mello. Mapeamento do Sequestro de Carbono e de Domos Urbanos de CO₂ em Ambientes Tropicais, por meio de Sensoriamento Remoto Hiperespectral. *Geografia (Rio Claro. Impresso)*, v. 29, p. 189-202, 2004.
- BIAS, Edilson de Souza. Vantagens e Limitações das Imagens de Alta Resolução como suporte ao Planejamento Urbano: O Exemplo de Sobradinho – Distrito Federal. 2003. 298 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geografia, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2003.
- CABRAL, Jaime. Movimento das Águas Subterrâneas. In: FEITOSA, Fernando A. C.; MANOEL FILHO, João. *Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações*. 2. ed. Fortaleza: Serviço Geológico do Brasil, 2000. Cap. 3. p. 35-51.
- CADENASSO, Mary L.; PICKETT, Steward T. A.; SCHWARZ, Kirsten. Spatial heterogeneity in urban ecosystems: reconceptualizing land cover and a framework for classification. *Frontiers in Ecology and The Environment*, [s.l.], v. 5, n. 2, p.80-88, mar. 2007. Wiley. [http://dx.doi.org/10.1890/1540-9295\(2007\)5\[80:shiuer\]2.0.co;2](http://dx.doi.org/10.1890/1540-9295(2007)5[80:shiuer]2.0.co;2).
- CALUX, Jucelmo; THOMAZ, Edivaldo Lopes. INTERCEPTAÇÃO E PRECIPITAÇÃO INTERNA: COMPARAÇÃO ENTRE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA PINUS. *Geoambiente On-line*, [s.l.], n. 19, p.01-16, 3 jan. 2013. Universidade Federal de Goiás. <http://dx.doi.org/10.5216/revgeoamb.v0i19.26049>.
- CHUI, Ting Fong May; TRINH, Dieu Huong. Modelling infiltration enhancement in a tropical urban catchment for improved stormwater management. *Hydrological Processes*, [s.l.], p.4405-4419, 2016. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.10926>.
- CONGALTON, Russel G.; GREEN, Kass. *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices*. 2. ed. Boca Raton: Crc Press, 2008. 210 p.
- CRÓSTA, Álvaro Penteado. *Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto*. Campinas, São Paulo: Unicamp, 1992. 170 p.
- CUI, Yaokui; JIA, Li; HU, Guangcheng. Mapping of Interception Loss of Vegetation in the Heihe River Basin of China Using Remote Sensing Observations. *Ieee Geoscience and Remote Sensing Letters*, [s.l.], v. 12, n. 1, p.23-27, jan. 2015.

Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
<http://dx.doi.org/10.1109/lgrs.2014.2324635>.

CUI, Yaokui et al. Global water cycle and remote sensing big data: overview, challenge, and opportunities. *Big Earth Data*, [s.l.], v. 2, n. 3, p.282-297, 3 jul. 2018. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/20964471.2018.1548052>.

CUOMO, S.; DELLA SALA, M. Rainfall-induced infiltration, runoff and failure in steep unsaturated shallow soil deposits. *Engineering Geology*, [s.l.], v. 162, p.118-127, jul. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.05.010>.

DARBOUX, F et al. Evolution of soil surface roughness and flowpath connectivity in overland flow experiments. *Catena*, [s.l.], v. 46, n. 2-3, p.125-139, jan. 2002. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0341-8162\(01\)00162-x](http://dx.doi.org/10.1016/s0341-8162(01)00162-x).

DIMITROV, Stelian et al. Integrated assessment of urban green infrastructure condition in Karlovo urban area by in-situ observations and remote sensing. *One Ecosystem*, [s.l.], v. 3, p.1-23, 21 fev. 2018. Pensoft Publishers. <http://dx.doi.org/10.3897/oneeco.3.e21610>.

GALVÃO, Lênio Soares. Do sensoriamento remoto multiespectral para o hiperespectral: o comportamento espectral dos materiais visto do espaço. In: MENESES, Paulo Roberto et al. *Reflectância dos Materiais Terrestres*. Brasília: Oficina de Textos, 2019. Cap. 8 p. 249-265.

GONÇALVES, R.R.V. Relação entre a resposta espectral da cana-de-açúcar, registrada nas imagens dos satélites AVHRR/NOAA, em São Paulo, e dados agroclimáticos, no período de 2001 a 2008. 2008. 163p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Agrícola - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

HUETE, A. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, [s.l.], v. 25, n. 3, p.295-309, ago. 1988. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-x](http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-x).

JENSEN, John R.; COWEN, Dave C. Remote Sensing of Urban/Suburban Infrastructure and Socio-Economic Attributes. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Columbia, v. 65, n. 5, p.611-622, maio 1999.

KOOISTRA, Lammert et al. Assessing and predicting biodiversity in a floodplain ecosystem: Assimilation of net primary production derived from imaging spectrometer data into a dynamic vegetation model. *Remote Sensing of Environment*, [s.l.], v. 112, n. 5, p.2118-2130, maio 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2007.10.010>.

LINDEN, S. van Der; HOSTERT, P. The influence of urban structures on impervious surface maps from airborne hyperspectral data. *Remote Sensing of Environment*, [s.l.], v. 113, n. 11, p.2298-2305, 16 nov. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2009.06.004>.

LIVESLEY, S.j.; BAUDINETTE, B.; GLOVER, D. Rainfall interception and stemflow by eucalypt street trees – The impacts of canopy density and bark type. *Urban Forestry & Urban Greening*, [s.l.], v. 13, n. 1, p.192-197, 2014. Elsevier BV. .

LLORENS, Pilar; DOMINGO, Francisco. Rainfall partitioning by vegetation under Mediterranean conditions. A review of studies in Europe. *Journal of Hydrology*, [s.l.],

v. 335, n. 1-2, p.37-54, mar. 2007. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.10.032>.

MARTINS, Éder de Sousa. Compartimentação Geomorfológica do Distrito Federal. Embrapa Cerrados, Planaltina, Distrito Federal, 2004. 57 p.

MARTINS, Nuno Miguel Nogueira. Utilização de imagens de satélite de alta resolução para a extracção de elementos em ambiente urbano. 2012. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Geográfica, Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia da Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2012.

MENESES, Paulo Roberto. Princípios do Sensoriamento Remoto. In: MENESES, Paulo Roberto e ALMEIDA, Tati de. Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto: CNPq, 2012. Cap. 1. p. 1-31.

PAN, Chengzhong; SHANGGUAN, Zhouping. Runoff hydraulic characteristics and sediment generation in sloped grassplots under simulated rainfall conditions. *Journal of Hydrology*, [s.l.], v. 331, n. 1-2, p.178-185, nov. 2006. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.05.011>.

PAZ, Adriano Rolim da. Hidrologia Aplicada. Caxias do Sul: Disciplina Ministrada na Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, 2004. 138 p.

RAHMAN, A. F. et al. Potential of MODIS ocean bands for estimating CO₂ flux from terrestrial vegetation: A novel approach. *Geophysical Research Letters*, [s.l.], v. 31, n. 10, p.1-4, maio 2004. American Geophysical Union (AGU).
<http://dx.doi.org/10.1029/2004gl019778>.

ROSA, Roberto. Introdução ao Sensoriamento Remoto. Uberlândia, Minas Gerais: Editora Universidade Federal de Uberlândia, 1990. 136 p.

SANO, Edson Eyji et al. Reflectância da Vegetação. In: MENESES, Paulo Roberto et al. Reflectância dos Materiais Terrestres. Brasília: Oficina de Textos, 2019. Cap. 6. p. 189-223.

SANO, Edson Eyji, BORGES, Elaine Fiúza. Séries Temporais: comportamento espectral de imagens multidas. In: MENESES, Paulo Roberto et al. Reflectância dos Materiais Terrestres. Brasília: Oficina de Textos, 2019. Cap. 9. p. 267-289.

SHARMA, K.m.s.; SARKAR, A. A Modified Contextual Classification Technique for Remote Sensing Data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Kharagpur, v. 64, n. 4, p.273-280, abr. 1998.

SOUSA, K.; ALMEIDA, C.; VIEIRA, F.; MOURA, P; NETO, J. Mapeamento do uso e ocupação do solo da Bacia do Rio Descoberto – DF utilizando imagens do satélite CBERS-2. In: XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2009, Natal. Anais eletrônicos INPE.

SOUZA FILHO, Carlos Roberto de. Sensoriamento Remoto Hiperespectral. 2004. Disponível em: <<https://mundogeo.com/blog/2004/08/23/sensoriamento-remoto-hiperespectral/>>. Acesso em: 01 jun. 2019.

TANG, Guoqiang et al. Statistical and Hydrological Comparisons between TRMM and GPM Level-3 Products over a Midlatitude Basin: Is Day-1 IMERG a Good Successor for TMPA 3B42V7?. *Journal of Hydrometeorology*, [s.l.], v. 17, n. 1, p.121-137, jan. 2016. American Meteorological Society. <http://dx.doi.org/10.1175/jhm-d-15-0059.1>.

TEOBALDO, Débora; BAPTISTA, Gustavo Macedo de Mello. Quantificação da severidade das queimadas e da perda de sequestro florestal de carbono em unidades de conservação do Distrito Federal¹. *Revista Brasileira de Geografia Física*, Brasília, v. 1, n. 9, p.250-264, dez. 2015. Disponível em: <www.ufpe.br/rbgfe>. Acesso em: 20 abr. 2019.

THOMAS, Nancy; HENDRIX, Chad; CONGALTON, Russell G. A Comparison of Urban Mapping Methods Using High-Resolution Digital Imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, [s.l.], v. 69, n. 9, p.963-972, 1 set. 2003. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. <http://dx.doi.org/10.14358/pers.69.9.963>.

TUCCI, Carlos; CLARKE, Robin. Impactos das mudanças da cobertura vegetal no escoamento: revisão. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, [s.l.], v. 2, n. 1, p.135-152, 1997. Fap UNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v2n1.p135-152>.

VILLA, Paolo. Mapping urban growth using Soil and Vegetation Index and Landsat data: The Milan (Italy) city area case study. *Landscape and Urban Planning*, [s.l.], v. 107, n. 3, p.245-254, set. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.06.014>.

ANG, Jun; ENDRENY, Theodore A.; NOWAK, David J. Mechanistic Simulation of Tree Effects in an Urban Water Balance Model 1. *Jawra Journal of the American Water Resources Association*, [s.l.], v. 44, n. 1, p.75-85, fev. 2008. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1752-1688.2007.00139.x>.

XIAO, Qingfu et al. A new approach to modeling tree rainfall interception. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, [s.l.], v. 105, n. 23, p.29173-29188, 1 dez. 2000. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2000jd900343>.

YANG, Jin-ling; ZHANG, Gan-lin. Water infiltration in urban soils and its effects on the quantity and quality of runoff. *Journal of Soils and Sediments*, [s.l.], v. 11, n. 5, p.751-761, 7 abr. 2011. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s11368-011-0356-1>.

ZHANG, J.; JIAO, J.j.; YANG, J. In situ rainfall infiltration studies at a hillside in Hubei Province, China. *Engineering Geology*, [s.l.], v. 57, n. 1-2, p.31-38, jun. 2000. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0013-7952\(99\)00126-x](http://dx.doi.org/10.1016/s0013-7952(99)00126-x).

CAPÍTULO 2: Potencialidade do CO₂flux para identificação dos elementos do ciclo hidrológico com dados Planet²

RESUMO

Mudanças na estrutura e distribuição da vegetação podem impactar o ciclo hidrológico em ambientes urbanos, prejudicando o processo de infiltração e causando problemas decorrentes da impermeabilização. Por meio da fotossíntese, a vegetação transforma CO₂ e H₂O em energia disponível, além de oferecer conforto térmico e outros serviços ecossistêmicos. O objetivo do estudo é atestar a POTENCIALIDADE DOS DADOS PLANETSCOPE PARA A IDENTIFICAÇÃO DA INTERFERÊNCIA ANTRÓPICA EM ELEMENTOS DO CICLO HIDROLÓGICO NO CAMPUS DARCY RIBEIRO por meio da detecção dos efeitos da sazonalidade climática no comportamento da vegetação, se utilizando do índice CO₂flux. Para tanto, foram utilizadas 4 imagens Planet, multiespectrais e com 3 metros de resolução espacial, como base de dados para o cálculo do índice CO₂flux. Este índice é o resultado da integração do NDVI e sPRI, os quais estão relacionados com o processo de fotossíntese da vegetação. A análise da sazonalidade climática e balanço hídrico demonstrou as variações de eficiência de sequestro de carbono em diferentes períodos do ano. No período seco, os valores de CO₂flux foram menores, devido ao comprometimento da fotossíntese pela falta de água. Vegetação de estrato herbáceo sofre variações mais bruscas entre períodos secos e chuvosos. Enquanto que a vegetação arbórea, por apresentar menor dependência hídrica, sofre menos variação no sequestro de carbono ao longo do ano. Áreas construídas e de solo exposto não apresentam sequestro de carbono, tornando possível distingui-las de áreas vegetadas se utilizando do CO₂flux. Conclui-se que, as áreas componentes do ciclo hidrológico, que preferencialmente favorecem a interceptação, infiltração e geração de escoamento superficial, podem ser identificadas usando dados Planet e o índice CO₂flux.

Palavras-chave: sensoriamento remoto; sequestro de carbono; variação sazonal; ciclo hidrológico; vegetação urbana.

² Artigo a ser submetido após a defesa à Revista GOT - Revista de Geografia e Ordenamento do Território do Centro de Estudos em Geografia e Ordenamento do Território dos Departamentos de Geografia das Universidades de Coimbra, Porto e Minho.

ABSTRACT

Changes in the structure and distribution of vegetation can impact the hydrological cycle in urban environments, impairing the infiltration process and causing problems resulting from waterproofing. Through photosynthesis, vegetation transforms CO₂ and H₂O into available energy, in addition to offering thermal comfort and other ecosystem services. The aim of this study is to certify the potentiality of Planet data to identify the hydrological cycle elements on the Darcy Ribeiro campus by detecting the effects of climatic seasonality on the behavior of vegetation, using the CO₂flux index. To do so, 4 multispectral and 3 meters of spatial resolution Planet images were used, as a database for the calculation of the CO₂flux index. This index is an integration of NDVI and sPRI, which are related to vegetation photosynthesis process. The analysis of climatic seasonality and water balance demonstrated the variations in carbon sequestration efficiency at different periods of the year. In the dry period, CO₂flux values were lower, due to the impairment of photosynthesis due to lack of water. Herbaceous strata vegetation undergoes more abrupt variations between dry and rainy periods. While tree vegetation, due to less water dependence, suffers less variation in carbon sequestration throughout the year. Built up and exposed soil areas do not present carbon sequestration, making it possible to distinguish them from vegetated areas using CO₂flux. It is concluded that the component areas of the hydrological cycle, which preferentially favor interception, infiltration and surface runoff generation, can be identified using Planet data and the CO₂flux index.

Key words: remote sensing; carbon sequestration; seasonal variation; hydrological cycle; urban vegetation.

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento urbano e as mudanças no uso do solo causam alterações que trazem consequências para o ambiente natural. O ciclo hidrológico e os processos naturais de drenagem são especialmente afetados pelo aumento de áreas impermeáveis no território, acarretando problemas de inundações, assoreamento e erosões (FRITZEN e BINDA, 2011).

O Distrito Federal (DF) se encontra no bioma Cerrado, onde a sazonalidade climática apresenta inverno seco e frio e verão quente e chuvoso. A disponibilidade hídrica por habitante no DF é baixa e é agravada pelas extensas áreas de irrigação às margens das cidades, o que mostra a importância de uma gestão eficiente de recursos hídricos (SOUZA et al., 2012), visto que a região é um dos grandes agregados urbanos do Brasil onde as capacidades do sistema de abastecimento de água sofrem constante aumento de demanda e estão frequentemente próximas de seus limites (LORZ et al., 2011; ZEE-DF, 2015).

O campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília está localizado próximo a uma área de alto grau de urbanização e densidade populacional, a Asa Norte. Além disso, parte do território do campus se encontra classificado como área de potencial perda de recarga de aquífero pelo Zoneamento Ecológico-Econômico do DF (ZEE-DF), em função da diminuição da capacidade de recarga do aquífero naquela região e rebaixamento do lençol freático (ZEE-DF, 2015).

A vegetação tem um papel fundamental nos fluxos da água. As mudanças na vegetação têm o potencial de influenciar o clima local, alterando as trocas de água e de energia entre a superfície terrestre e a atmosfera (BECERRA et al., 2010).

No contexto da vegetação urbana, o processo de interceptação da chuva pelo dossel é importante na avaliação e quantificação do escoamento superficial. As características fisiológicas das plantas influenciam nos efeitos da evapotranspiração no clima urbano e no ciclo hidrológico (MEILI et al., 2020).

A interceptação retém a parcela inicial da precipitação na superfície de folhagem. Quando esse volume retido pelas plantas é totalmente evaporado, as plantas passam a perder umidade para o ambiente através da transpiração. E então a planta retira umidade do solo através das suas raízes (TUCCI, 2002). Essa absorção da água pelas raízes das plantas pode ser limitada pela disponibilidade ou pela resistência hidráulica do solo (MEILI et al., 2020).

A parcela de precipitação que atinge o solo pode infiltrar ou escoar superficialmente dependendo da permeabilidade do solo. No contexto de balanço hídrico de determinado local, a cobertura florestal tem grande importância e pode alterar o mecanismo de entrada de água na superfície do solo. Para solos com superfície compactada, a capacidade de infiltração pode diminuir drasticamente, resultando em maior escoamento superficial (TUCCI, 2002; MOURA et al., 2009).

Sendo assim, a interceptação, a infiltração e o escoamento superficial são componentes essenciais no ciclo hidrológico e funcionam como parâmetro de partida para elucidar as questões ambientais relacionadas aos processos hidrológicos de uma região.

Nesse contexto, o sensoriamento remoto é uma ferramenta muito importante para o monitoramento da vegetação, visto que permite a obtenção de dados em larga escala de maneira rápida. Os dados de satélite fornecem informações valiosas para mapear e monitorar mudanças na vegetação (EL-MEZOUAR ET AL., 2011).

A empresa Planet foi criada em 2010 com o intuito de otimizar a visualização da Terra para os mais diversos usos, desenvolvendo e fazendo aquisição de satélites, com recursos de alto potencial em relação às características das imagens adquiridas, resolução espacial de 3 metros e resolução temporal de 24 horas (diária) (PLANET, 2020).

Tais características possibilitam maior acurácia em diversos tipos de estudos, como monitoramento de lavouras e análises de topografia (AATI e AVOUAC, 2020; KOKHAN e VOSTOKOV, 2020), por exemplo.

Além disso, imagens de alta resolução possibilitam o monitoramento de vegetação com maior precisão, o que é importante especialmente em ambientes urbanos. Os autores Gašparović e colaboradores realizaram uma fusão de imagens Planet com imagens Sentinel-2 para comparar os resultados de acurácia na detecção de vegetação em Zagreb, Croácia. Foi possível demonstrar a maior precisão de classificação nas imagens fusionadas (Planet e Sentinel-2) e também nas imagens Planet analisadas individualmente, em relação às do Sentinel-2, como esperado, segundo os resultados do estudo (GAŠPAROVIĆ et al., 2018).

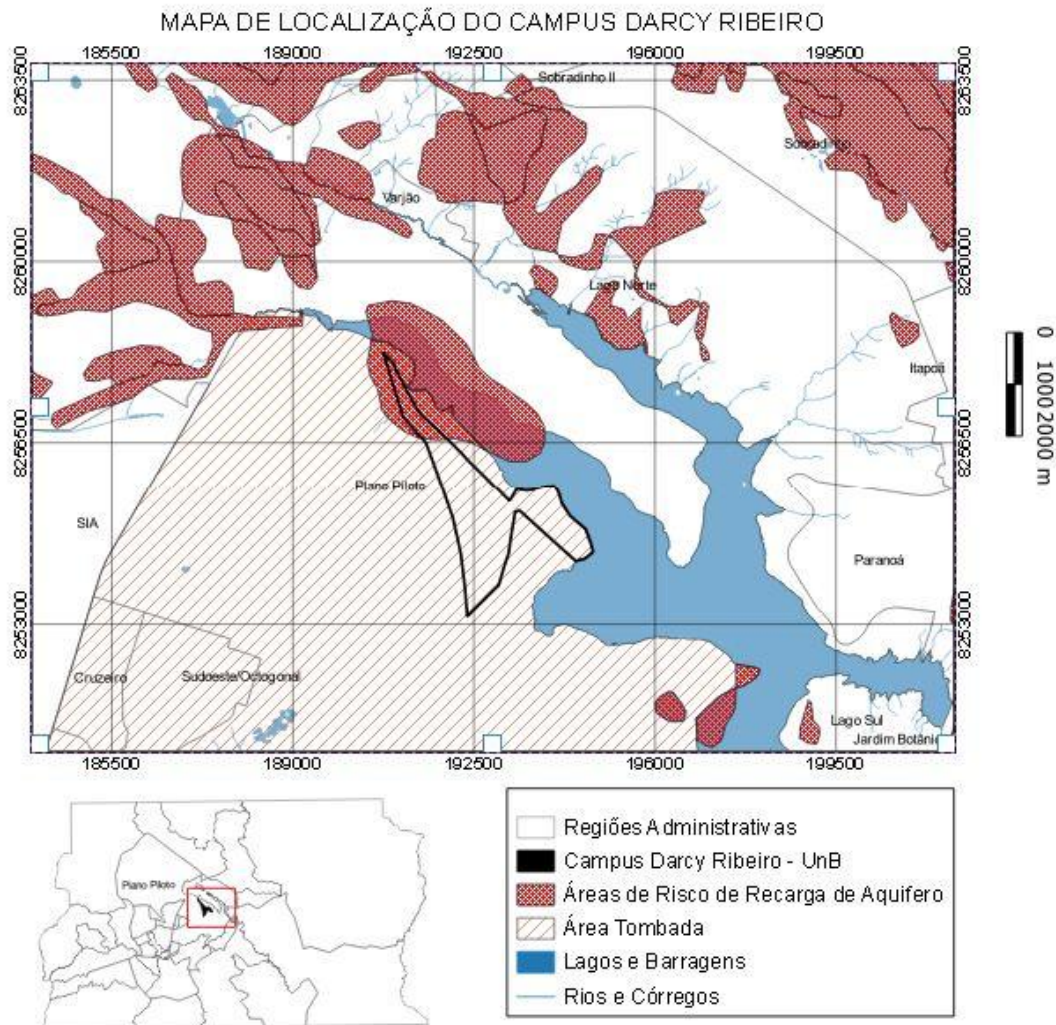
Outra característica importante das imagens Planet é a resolução temporal que confere alto potencial para a detecção de mudanças no uso do solo, visto que a cada 24 horas uma imagem nova é disponibilizada. Se utilizando deste recurso, os autores Francini e colaboradores desenvolveram um algoritmo que alerta perturbações em

florestas em tempo quase real, baseando-se em imagens Planet, produzindo um novo mapa com informações de mudanças na cobertura florestal assim que uma nova imagem é adquirida (FRANCINI et al., 2020).

Considerando a eficiência do uso de informação de alta resolução para o monitoramento da dinâmica da vegetação de forma ampla e eficiente, o objetivo desse estudo foi demonstrar a potencialidade dos dados Planet na identificação das áreas componentes do ciclo hidrológico e variações sazonais perceptíveis no comportamento da vegetação em seus diferentes estratos, por meio do índice CO₂flux, no campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília (UnB).

1. MATERIAL E MÉTODOS

O Campus Universitário Darcy Ribeiro está localizado no Plano Piloto de Brasília entre a Asa Norte e o Lago Paranoá. Ocupa área total de 3.950.579,07 m² e área construída de 552.171,40m² (CEPLAN, 2020). Encontra-se no bioma Cerrado e está integralmente inserido na área tombada como Patrimônio Cultural da Humanidade pela Unesco. No entanto, uma parte do Campus se encontra em área de risco de perda de recarga de aquífero (Zoneamento Ecológico Econômico do DF, 2015), como mostra o Mapa 1. Estes são indicativos de que é uma área tanto sensível quanto relevante dos pontos de vista ambiental e de planejamento urbano.



Mapa 1 – Localização da área de pesquisa, campus Darcy Ribeiro – Universidade de Brasília, no contexto do risco de recarga de aquíferos

O Cerrado possui grande contraste sazonal entre estações, o que exerce forte influência na fenologia da vegetação (SOUZA ET AL., 2016). Assim, foram escolhidos os meses de agosto 2018/2019 e dezembro 2018/2019 para representarem período seco e chuvoso respectivamente. Em seu estudo sobre a sazonalidade da vegetação no Cerrado, os autores Souza et al. (2016) mostraram que dados de precipitação apontam uma dinâmica de vegetação fortemente influenciada pelo regime de chuvas.

A Figura 1 representa os dados de temperatura e precipitação (eixos Y1 e Y2) para todos os meses dos anos de 2018 e 2019 (eixo X) e mostra a sazonalidade da temperatura e precipitação dos dois anos em questão.

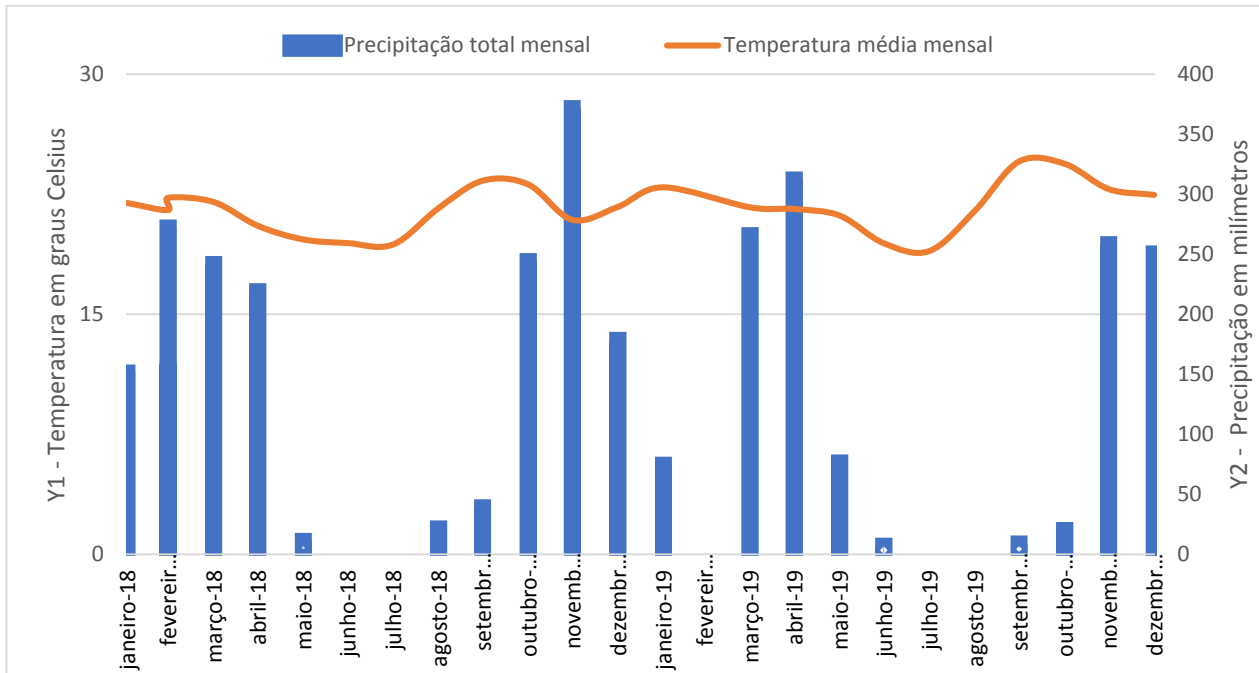


Figura 1 – Climograma, dados de temperatura média mensal e precipitação acumulada mensal da Estação Brasília/DF (INMET)

Para evidenciar o efeito da sazonalidade sobre o comportamento da vegetação, os critérios para a escolha das imagens foram a ausência de cobertura de nuvens e as datas de obtenção. As quatro cenas selecionadas contemplam o território das glebas A e B do campus Darcy Ribeiro (UnB), e foram tomadas em: período seco – 27/08/2018 e 22/08/2019; período chuvoso – 19/12/2018 e 21/12/2019.

A escolha da área de estudo se deu em razão da disponibilidade de imagens Planet de alta resolução novas no mercado, por meio de parceria entre a UnB e a empresa de consultoria Santiago e Sintra.

A coleta dos dados foi realizada em dois portais distintos. As imagens foram baixadas no portal da consultoria Santiago e Sintra, e os dados meteorológicos do site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Não foram necessários procedimentos de pré-processamento, visto que as imagens baixadas já vêm corrigidas para refletância no topo da atmosfera (TOA – *Top of Atmosphere*), com 0% de cobertura de nuvens e georreferenciada no sistema de coordenadas UTM, Datum WGS84, zona 23S.

As imagens Planet são obtidas pela constelação de satélites Dove, que fornece as imagens PlanetScope utilizadas neste trabalho. Essas imagens são do tipo multiespectrais e possuem 4 bandas (*blue*: 455 - 515nm; *green*: 500 - 590nm; *red*: 590 - 670nm; e infravermelho próximo – *NIR*: 780 - 860 nm), resolução radiométrica de 12

bits, são ortorretificadas e georreferenciadas e possuem 3 metros de resolução espacial (PLANET, 2020).

A metodologia de integração dos índices de vegetação NDVI e PRI, proposta por Rahman et al. (2000), resulta no índice CO2flux calculado conforme a equação (1):

$$(1) \quad CO2flux = sPRI * NDVI$$

Essa metodologia foi aplicada com o intuito de identificar áreas de infiltração, interceptação e de geração de escoamento por meio da avaliação dos níveis de sequestro de carbono ao longo da área de estudo.

O NDVI e o PRI são índices espectrais do tipo diferença normalizada. O NDVI, *Normalized Difference Vegetation Index*, ou Índice de Vegetação por Diferença Normalizada, se baseia no princípio de que uma vegetação saudável demonstra um vale de absorção na faixa do vermelho e um pico de reflectância no início da faixa do infravermelho próximo (equação 2).

$$(2) \quad NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$$

Portanto, a vegetação pouco saudável ou esparsa reflete mais luz visível (banda do vermelho) e menos luz infravermelha próxima (KINYANJUI, 2010). Esse índice é sensível a clorofila e fornece informações sobre parâmetros biofísicos do dossel (SOUZA ET AL. 2016).

O PRI, *Photochemical Reflectance Index*, ou Índice de Reflectância Fotoquímica, expressa a eficiência do uso da luz na fotossíntese, pois detecta a resposta dos pigmentos do ciclo da xantofila a mudanças nas condições do ambiente (equação 3).

$$(3) \quad PRI = \frac{(BLUE - GREEN)}{(BLUE + GREEN)}$$

Os valores de PRI precisam ser reescalados (transformando-o em sPRI) para representá-lo como uma medida de eficiência. Para tanto, Rahman et al. (2000) fizeram uma manipulação algébrica adicionando 1 ao valor de PRI e dividindo-o por 2 (RAHMAN, ET AL., 2000), conforme equação 4:

$$(4) \quad sPRI = \frac{PRI + 1}{2}$$

Baptista (2003) aponta que diversos estudos mostram o PRI como um índice correlacionado ao uso eficiente da luz na fotossíntese e o NDVI ao verdor da vegetação. Isso acontece porque quanto maior for a atividade fotossintética, maior serão as feições de absorção no azul e no vermelho (BAPTISTA, 2003). A partir de

tais informações é possível entender o funcionamento da integração desses índices resultando no CO2flux para medir a eficiência do sequestro de carbono.

Rahman et al. (2000) propuseram e testaram o CO2flux para floresta de coníferas em zona temperada, validando-o por meio de experimentos em campo. Para ambiente tropical, o índice foi testado e validado para os Biomas Amazônia e Caatinga por Pedroza da Silva (2014) e Santos (2017) respectivamente. Visto que o Cerrado é um bioma cujas características fotossintéticas se encontram no meio termo entre Amazônia e Caatinga, o índice CO2flux foi utilizado neste trabalho como método de análise da variação sazonal do sequestro de carbono pela vegetação.

As etapas de desenvolvimento da pesquisa são apresentadas na Figura 2:

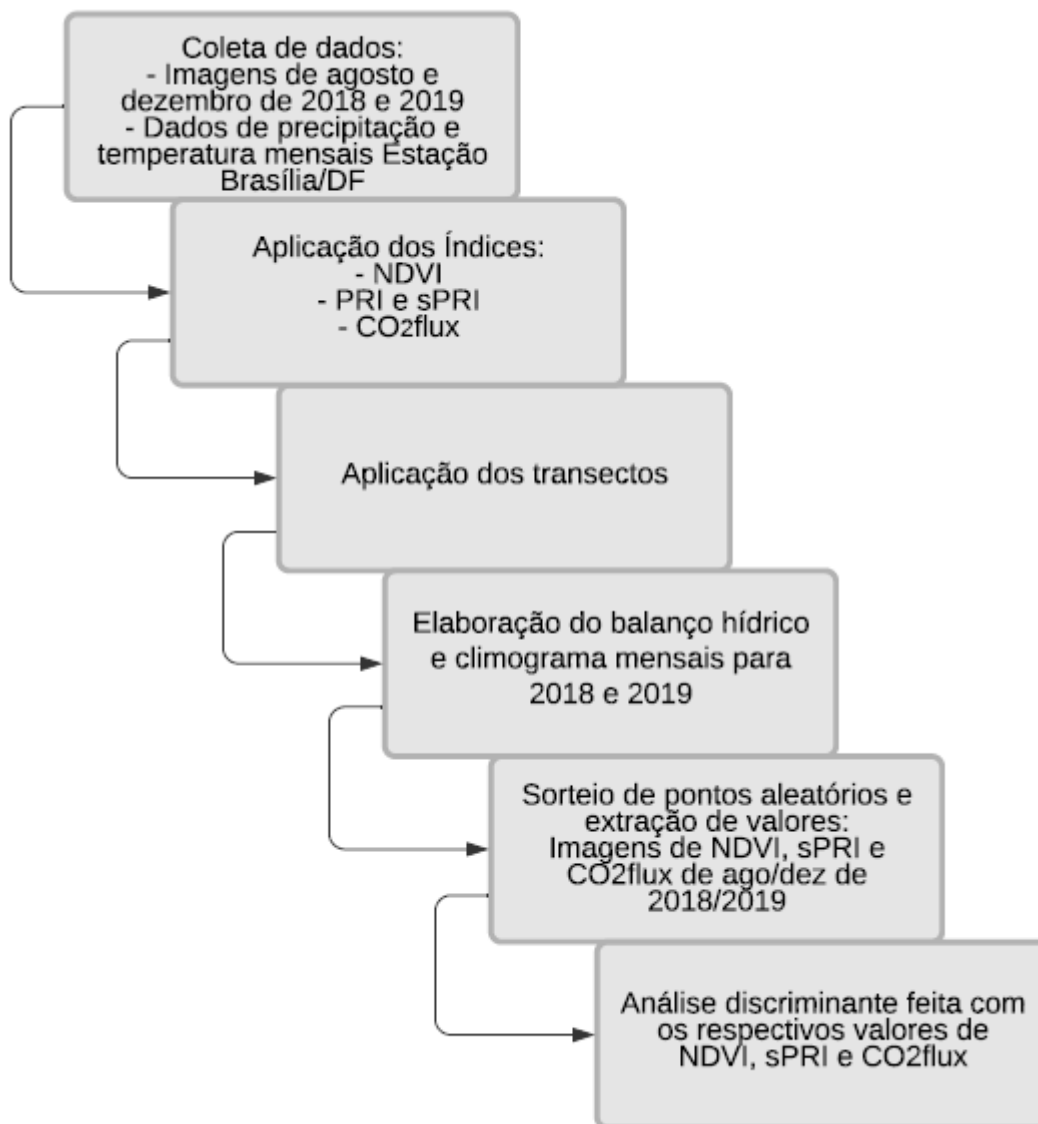


Figura 2 – Fluxo de etapas da pesquisa

Esta foi uma oportunidade importante de se gerar dados com imagens comerciais de alta resolução e verificar a potencialidade desses dados para o estudo da variação sazonal da vegetação, como forma de auxiliar no planejamento urbano e manejo de recursos hídricos.

Os níveis mais claros de cinza da imagem (Figura 3) representam os maiores valores de CO₂flux, conforme os tons de cinza vão escurecendo, menores são os valores. Isso significa que as áreas mais claras são vegetação, locais onde o sequestro de carbono ocorre em maior ou menor medida a depender do verdor e características daquela vegetação. Áreas em tons mais escuros de cinza representam locais onde a atividade fotossintética é baixa ou inexistente, ou seja, são as áreas construídas e de solo exposto onde, portanto, não ocorre sequestro de carbono.

Para a definição dos transectos, o critério base foi a abrangência da maior diversidade possível de alvos dos diferentes elementos em estudo: áreas de solo exposto; vegetação herbácea, arbustiva e arbórea; e áreas construídas, para que fosse possível a identificação e análise do comportamento dos diferentes alvos em período seco e chuvoso de cada ano. Foram definidos dois transectos na imagem: um na Gleba A, que passa da ponta mais ao norte em linha reta até a ponta mais ao sul (de A até B), e outro na Gleba B, abrangendo alvos no Centro Olímpico (de C até D), conforme a Figura 3 abaixo:

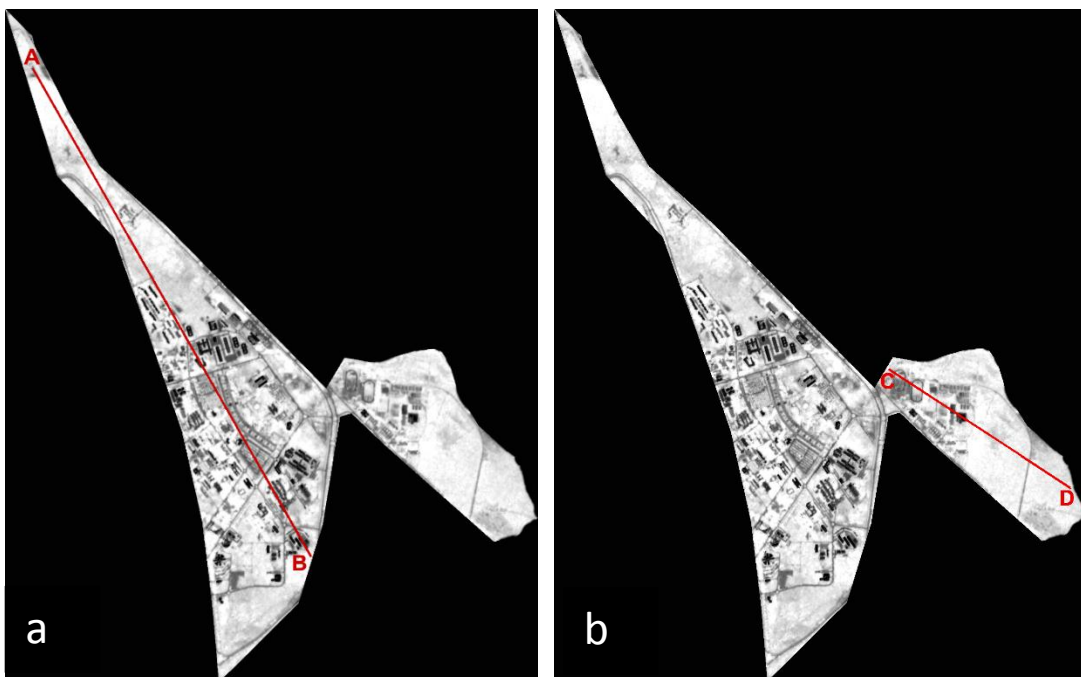


Figura 3 – Transecto Gleba A (a); Transecto Centro Olímpico – Gleba B (b); imagem de dezembro/2019 usada como exemplo. Análise feita nos alvos do ponto A ao B; e do ponto C ao D.

O comportamento da vegetação ao longo de diferentes períodos do ano está relacionado com a variabilidade hídrica da região, ou seja, com o balanço hídrico do período em questão. O balanço hídrico pode ser entendido como o resultado da quantidade de água que entra e sai de um sistema em um determinado intervalo de tempo. Em escala global, o balanço hídrico resulta na quantidade de água disponível no sistema (no solo, rios, lagos, vegetação úmida e oceanos), ou seja, na biosfera, apresentando um ciclo fechado (ANA, 2009).

O Balanço Hídrico Climatológico desenvolvido por Thornthwaite e Mather (1955) possibilita determinar o regime hídrico de um local sem necessidade de medidas diretas das condições do solo (PEREIRA, 2005). Esse método considera que a variação do armazenamento de água do solo (ΔARM) é uma função exponencial que envolve a capacidade de água disponível do solo (CAD – máximo de água disponível que um solo pode reter de acordo com suas propriedades) e a perda de água acumulada no solo (negativo acumulado - NAc) (ROLIM ET AL., 1998).

O armazenamento de água no solo, ou água retida (ARM), é calculado em função da perda potencial de água acumulada. Para meses em que a evapotranspiração potencial (ETP) é superior à precipitação (P) (ou seja, o solo está secando), a perda potencial de água é dada em função da diferença $P - ETP$. Havendo uma sequência de períodos nessa condição, a água retida no solo será uma função sequencial dos valores negativos acumulados de $P - ETP$, ou seja, da perda potencial acumulada (PEREIRA, 2005). Mendonça (1958) propôs uma simplificação no método de Thornthwaite-Mather, na qual todas as tabelas de água retida (ARM) são substituídas pela equação adimensional (5):

$$(5) \quad \frac{ARM}{CAD} = \exp \left[\frac{NAc}{CAD} \right]$$

Quando da ocorrência de um mês com $P - ETP > 0$ durante o período seco em quantidade insuficiente para atingir a CAD, seguido novamente por outro mês seco, calcula-se o NAc do mês anterior adicionado do $P - ETP$ do mês em curso. Essa condição é mais comum quando se efetua o BHC ao longo de anos reais (não com valores normais) (PEREIRA, 2005).

Utilizando-se desse método, Rolim, Sentelhas e Barbieri (1998) elaboraram um programa em ambiente excel para os cálculos de BHC Normal, utilizado neste trabalho para obter os momentos de deficiência e excedente hídricos para os anos de 2018 e 2019, gerando os resultados apresentados nas Figuras 11 e 12. O programa se utiliza

do método de Thorthwaite (1948) para o cálculo da ETP, o qual possui a vantagem de necessitar somente dos dados de temperatura média e latitude local, fornecendo resultados confiáveis (ROLIM ET AL., 1998). Com base na metodologia apresentada adotou-se CAD de 100mm como dado de entrada no programa. A inicialização do BH Normal segue o critério de Mendonça (1958).

Por fim, foi realizada uma análise estatística multivariada que se deu em duas fases. Primeiramente foram sorteados 250 pontos aleatórios em toda a extensão do campus no software *QG/S*. Depois foram extraídos os valores de NDVI, sPRI e CO₂flux desses mesmos pontos, tanto para agosto 2018/2019 como para dezembro 2018/2019. Posteriormente, a análise discriminante foi realizada no software *BioEstat* para verificação da separabilidade dos dados em: seca/2018 e seca/2019; chuva/2018 e chuva/2019; seca/2018 e chuva/2019; chuva/2018 e seca/2019; seca/2018 e chuva/2019; e seca/2019 e chuva/2019.

A análise discriminante é uma técnica da estatística multivariada utilizada para discriminar e classificar objetos. A técnica consiste em se obter uma combinação linear de características observadas que apresente maior poder de discriminação entre populações. Esta combinação linear é denominada função discriminante. O *BioEstat* se utiliza da metodologia de Fisher, que é uma combinação linear de características originais, a qual se caracteriza por produzir separação máxima entre duas populações (VARELLA, 2004).

2. RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.1 Comportamento Sazonal da Vegetação

Os transectos estabelecidos para as Glebas A e B do campus geraram os resultados apresentados nas Figuras 4 e 10. Os valores de CO₂flux denotam comportamento esperado, atestando a potencialidade dos dados PlanetScope para identificação do sequestro de carbono.

Os valores de CO₂flux resultantes dos transectos revelam a variação de sequestro de carbono entre estação seca e chuvosa. Este processo acontece em maior medida com a vegetação herbácea, visto que esse tipo de vegetação tem maior dependência hídrica. Em contrapartida, áreas em que ocorre vegetação arbustiva e arbórea a variação entre período seco e chuvoso tende a diminuir.

Da mesma forma, situação análoga acontece em áreas com pouca ou nenhuma vegetação, que é o caso de áreas construídas. O sequestro de carbono sofre pouca variação sazonal e o CO₂flux chega a valores negativos.

É interessante ressaltar que áreas de solo exposto e áreas construídas, apesar de serem alvos compostos de materiais distintos, têm respostas semelhantes nos índices espectrais avaliados, e possuem o mesmo comportamento hidráulico, funcionando como áreas de escoamento superficial por serem impermeabilizadas.

Por outro lado, áreas com vegetação herbácea, como por exemplo os gramados, têm o processo de fotossíntese tão prejudicado com a falta de chuvas, que resseca a ponto de sua resposta para o CO₂flux se aproximar bastante, ou até se misturar, com a resposta de solo exposto.

O gráfico apresentado na Figura 5 inicia com altos valores de CO₂flux e com pouca variação entre eles para ambos os anos e períodos, o que representa uma área mais densamente vegetada, com quantidade significativa de árvores e arbustos.

Conforme se avança pelo transecto ao longo do território pode-se notar claramente a diferença nos valores de CO₂flux entre estação chuvosa e seca de cada ano. Os meses de agosto tanto de 2018 quanto de 2019 apresentam valores menores que os meses de dezembro 2018/2019 principalmente onde há ocorrência de vegetação herbácea. O sequestro de carbono nessas áreas é menor nos meses de seca, pois o processo de fotossíntese está comprometido pela falta de água.

Nas áreas em que aparecem os menores valores de CO₂flux no gráfico da Figura 5 é possível perceber que, como foi dito anteriormente e é ilustrado aqui, de maneira análoga ao comportamento da vegetação arbórea, a porção de área construída demonstra pouca variação sazonal. Os valores de CO₂flux são baixos tanto para estação chuvosa quanto para a seca em ambos os anos.

Por fim, assim como na Figura 5, a Figura 6 apresenta nas áreas construídas valores bastante semelhantes de CO₂flux para todos os períodos de ambos os anos, ou seja, sem variação sazonal representativa.

Entretanto, existe uma discrepância no gráfico da Figura 5 referente a valores muito baixos de CO₂flux em uma área na imagem de agosto de 2018, a qual se apresenta com uma diferença significativa em relação aos valores do mesmo período de 2019. Ao passo que, para a mesma área, os valores do período chuvoso de ambos os anos é condizente com a presença de vegetação no local, indicando que, em 2018,

algum evento causou a supressão dessa vegetação, ou que a seca daquele ano foi bastante rigorosa.

Uma explicação possível para essa teoria é que o ano de 2018 teve o período de seca intenso devido ao El Niño ocorrido em 2016. El Niño é um fenômeno multidecadal de variabilidade da circulação atmosférica, associado ao aumento na temperatura da superfície do mar. Seus efeitos sobre a porção sudeste da América do Sul estão relacionados principalmente à redução das taxas de precipitação durante o verão chuvoso, devido à diminuição da atividade de convecção atmosférica associada à Zona de Convergência do Atlântico Sul. O El Niño ocorrido em 2016 foi muito intenso, causando uma das secas mais severas da história (BATISTA ET AL., 2018).

As áreas descritas a seguir são exemplos do que representam os valores de CO₂flux obtidos com os transectos, ilustrando este e outros pontos importantes. Foram selecionados os pixels 70, 390, 591, 738 e 842 no transecto da Gleba A, apontados no gráfico da Figura 4:

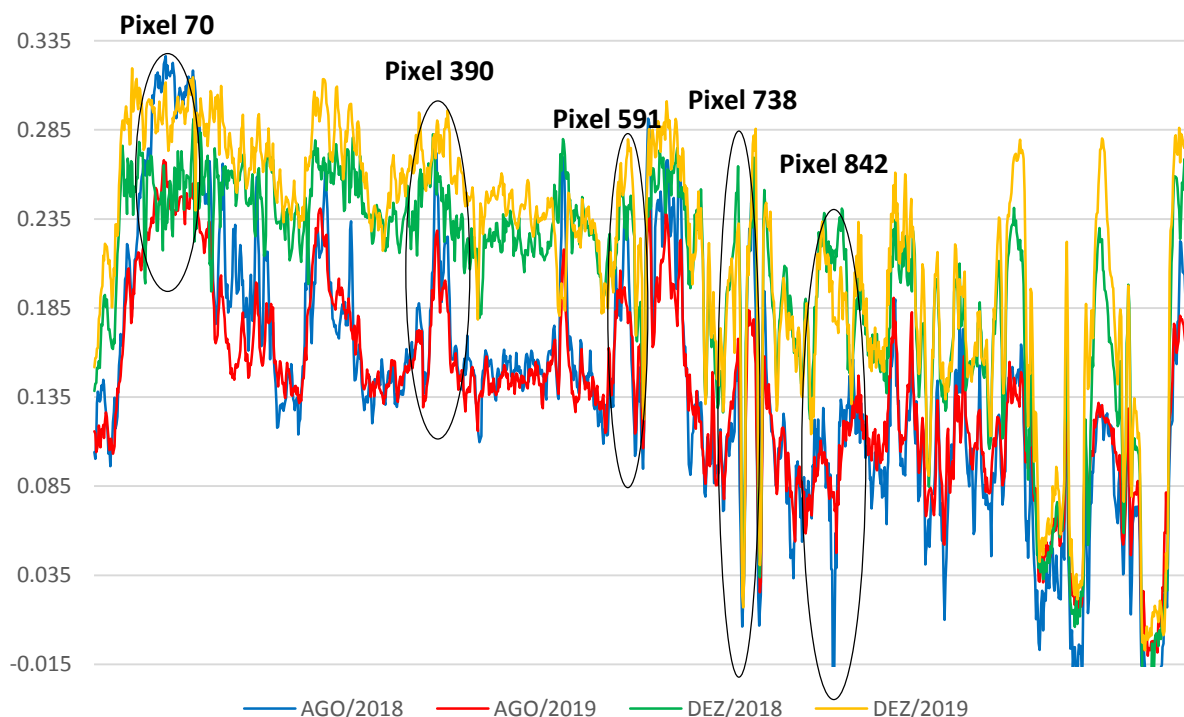


Figura 4 – Transecto Gleba A com indicação de local dos pixels analisados. Eixo X representa os pixels da imagem ao longo do transecto (A → B, da esquerda para a direita); Eixo Y representa os valores de CO₂flux desses pixels.

O pixel 70 (Figura 5) representa o início do transecto da Gleba A, onde ocorre em maior quantidade vegetação arbórea densa e também os maiores valores de CO₂flux. Em agosto/2018 e dezembro/2018 os valores são 0,3 e 0,25 e em agosto/2019 e dezembro/2019, 0,24 e 0,29. A vegetação arbórea dispõe de raízes mais profundas que a herbácea, o que possibilita atingir níveis mais profundos de água no solo, sendo assim, Souza (2016) aponta que a vegetação de raízes profundas proporciona maior estabilidade da atividade fotossintética.

Figura 5: Foto e imagem correspondentes ao pixel 70



Fonte: Autoria Própria

Para a análise de estratos vegetativos menores foi selecionado o pixel 591 (Figura 6), com CO₂flux de 0,12 para agosto/2018, 0,19 para dezembro/2018, 0,14 para agosto/2019 e 0,19 para dezembro/2019.

Conforme é possível observar na foto da Figura 9, a área de gramado está quase completamente seca, pois a foto foi tirada em agosto.

Este resultado é condizente com o que concluem Rocha et al. (2009) em seu estudo sobre padrões de fluxo de água e calor em diferentes fitofisionomias vegetais brasileiras, da floresta amazônica ao cerrado. Os autores apresentaram que os locais mais a sudeste da região de estudo eram mais secos e apresentavam uma diminuição da evapotranspiração durante períodos sem chuva, o que correlacionaram com a baixa taxa de umidade do solo. A diminuição do teor de umidade do solo é um padrão típico do cerrado brasileiro, com sua marcada sazonalidade nos níveis de índice de área foliar e biomassa resultantes da senescência foliar e dormência das gramíneas durante a seca (ROCHA ET AL., 2009).

Figura 6: Foto e imagem correspondentes ao pixel 591



Fonte: Autoria Própria

No período chuvoso o verdor dos gramados aumenta, o que aumenta também o sequestro florestal de carbono, justificando os maiores valores de CO₂flux nos meses de dezembro em ambos os anos.

Song & Wang (2011) afirmam que a diferença sazonal dos fluxos médios de carbono é bastante clara, sendo os fluxos no verão (chuvoso) menores, em resposta a absorção de carbono pela vegetação urbana, em seu estudo realizado em Beijing, China.

Para área construída foi selecionado o pixel 738 (Figura 7) com valores de CO₂flux de 0,006 e 0,03 para agosto e dezembro/2018 e 0,03 e 0,02 para agosto e dezembro/2019, o que apresenta valores bastante baixos e variação pequena, condizente com áreas construídas. A partir dessa análise é possível verificar quais são as áreas de solo impermeável, por onde a água da chuva não poderá infiltrar, por meio da análise dos valores de CO₂flux. Este pixel corresponde a uma área da Faculdade de Direito do campus.

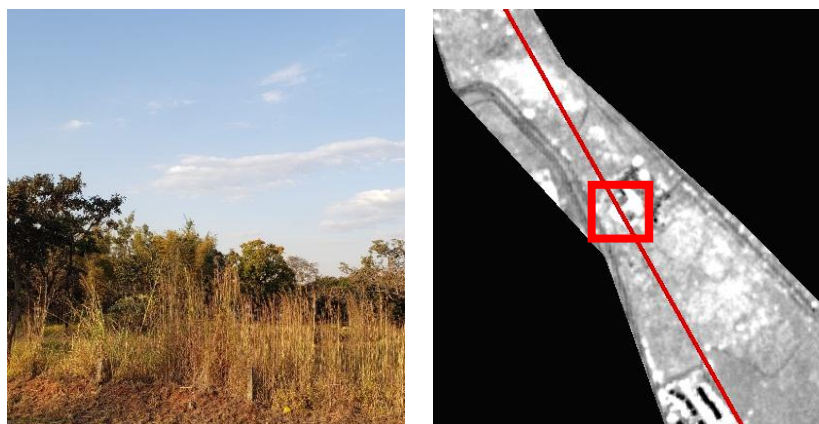
Figura 7: Foto e imagem correspondentes ao pixel 738



Fonte: Autoria Própria

O pixel 390 (Figura 8) fornece valores de CO₂flux de 0,27 e 0,24 para agosto e dezembro/2018 e 0,22 e 0,28 para agosto e dezembro/2019 respectivamente, o que indica se tratar de vegetação com atividade fotossintética considerável, podendo ser arbustiva e até arbórea. A foto do local ilustra esta afirmação, mostrando uma área de mistura de estratos vegetativos.

Figura 8: Foto e imagem correspondentes ao pixel 390



Fonte: Autoria Própria

A discrepância citada anteriormente aparece no pixel 842 (Figura 9) do transecto correspondente à Figura 4, o qual apresenta valores de -0,04 e 0,21 para agosto e dezembro/2018 e, 0,08 e 0,17 para agosto e dezembro/2019. Os dados de agosto são valores extremamente baixos de CO₂flux que indicam que não há atividade fotossintética no local.

Entretanto, os valores para a estação chuvosa são condizentes com a presença de vegetação. Na foto é possível observar que há sim vegetação no local e, sendo assim, o que pode ter acontecido é que essa é uma espécie de vegetação caducifólia, que perde as folhas em períodos secos. Sano et al., (2019) explicam que em dosséis

com folhas esparsas, parte do fluxo de radiação pode atravessá-lo sem ser interceptado e atingir o solo. A reflectância que retorna do solo e se soma a do dossel altera os valores de reflectância da vegetação (SANO ET AL., 2019).

Ao se utilizar do CO₂flux para identificação de componentes do ciclo hidrológico é preciso atentar-se para situações como essa, pois as propriedades de cada componente podem mudar conforme os fatores climáticos locais, gerando respostas espectrais discrepantes como esta em que se necessita analisar com maior cuidado.

Figura 9: Foto e imagem correspondentes ao pixel 842



Fonte: Autoria Própria

O que é interessante destacar no comportamento da Figura 10 (transecto Gleba B – Centro Olímpico) é que este corrobora com a teoria de que, como visto nas análises anteriores, agosto de 2018 ocorreu um período de seca mais intenso. O meio para o final do gráfico corresponde à área de preservação do Centro Olímpico (Figura 10) e é uma área com maior extensão de vegetação de diferentes estratos, onde é possível observar que os valores de agosto de 2018 são menores que os valores de agosto de 2019. As demais áreas apresentam basicamente as mesmas respostas da Figura 4 (gráfico do transecto da Gleba A) em relação aos elementos abordados.

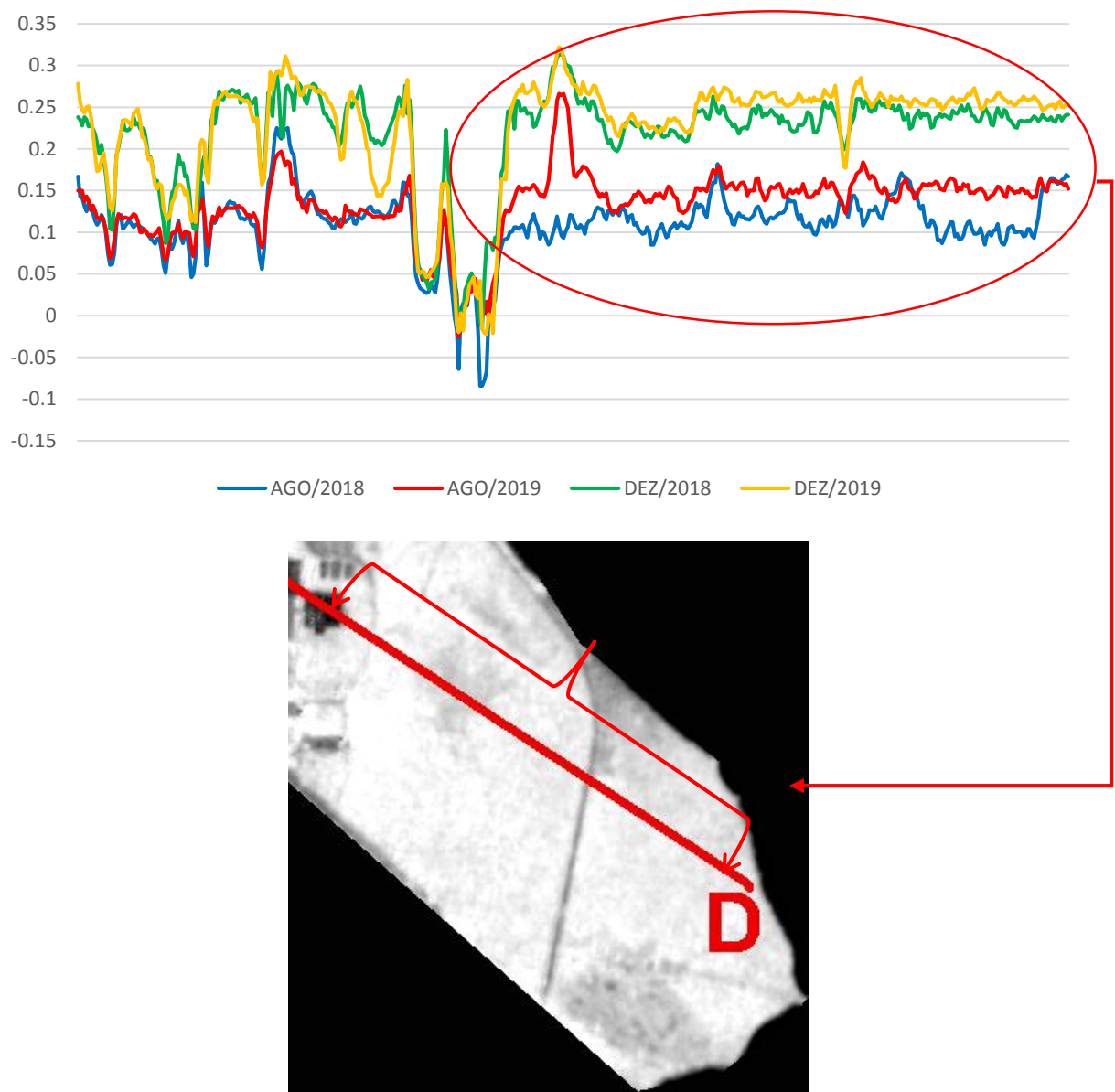


Figura 10 – Porção correspondente a área de preservação do Centro Olímpico demonstrando o comportamento da vegetação (a área destacada no gráfico do transecto corresponde à porção indicada pela chave na imagem)

Em razão da pandemia do novo coronavírus que se estende até este momento (agosto/2020), a Universidade de Brasília permanece fechada, motivo pelo qual não foi possível entrar no CO para tirar fotos.

2.2 Balanço Hídrico

As Figuras 11 e 12 ilustram os períodos em que houve deficiência, excedente, retirada e reposição de água no solo. Essas informações são inteiramente correlacionáveis com o comportamento da vegetação e, conseqüentemente, com os níveis de sequestro de carbono.

Deficiência, Excedente, Retirada e Reposição Hídrica ao longo do ano 2018

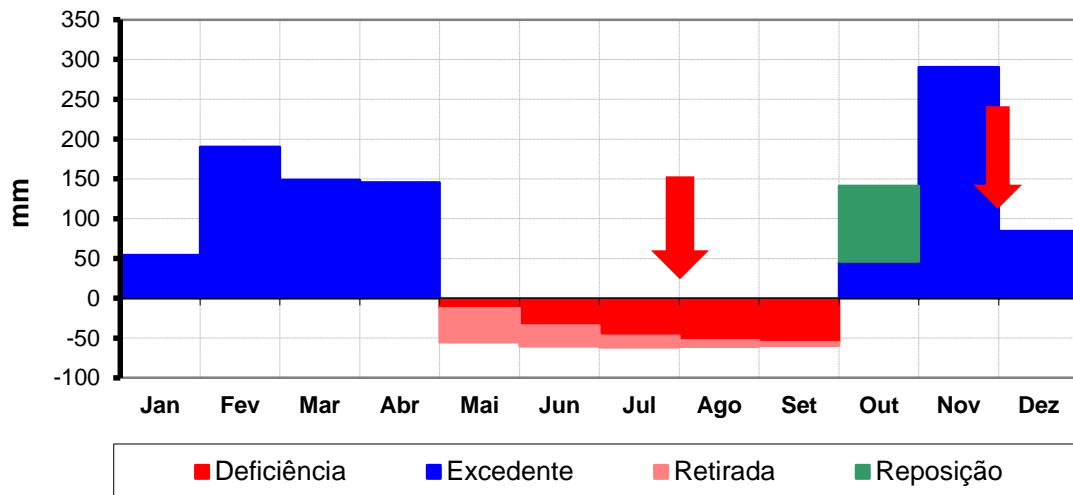


Figura 11 – Balanço hídrico climatológico normal do ano de 2018

Deficiência, Excedente, Retirada e Reposição Hídrica ao longo do ano 2019

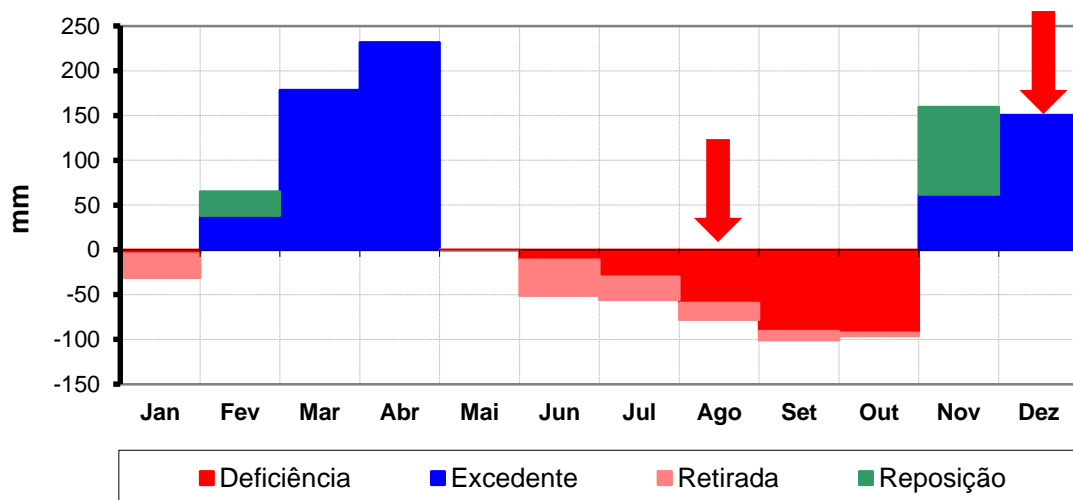


Figura 12 – Balanço hídrico climatológico normal do ano de 2019

Em 2018 o período de seca se estendeu de maio a setembro (Figura 11). Sem chuva, a umidade vai sendo retirada do solo até chegar na deficiência, momento em que as plantas perdem seu vigor. Comparativamente com as análises feitas nos transectos é possível notar esse processo no comportamento da vegetação em

agosto. Neste mesmo ano, a chuva retorna em outubro e o solo atinge novamente sua capacidade máxima de armazenamento, gerando excedente hídrico, momento em que, na imagem de dezembro, é possível verificar que as plantas já retomaram seu vigor e atividade fotossintética.

Na Figura 12 nota-se que em janeiro/2019, período que normalmente apresentaria excedente hídrico, há na verdade a retirada e a deficiência. Possivelmente, a precipitação total em dezembro de 2018 e janeiro de 2019 pode não ter sido suficiente para que a diferença $P - ET$ fosse positiva, levando em consideração que o verão em países do hemisfério sul é marcado por intensa radiação, favorecendo o aumento da evapotranspiração e conseqüentemente, da deficiência hídrica (SOUZA ET AL., 2014). O mesmo comportamento atípico de deficiência hídrica em período chuvoso também foi notado pelos autores Souza et al. (2014) em seu estudo na bacia do Rio Caravelas (BA).

Para os meses analisados com imagens Planet houve deficiência de 52,9mm em agosto/2018 e 59,4mm em agosto/2019, e excedente de 84,3mm em dez/2018 e 150,6mm em dez/2019.

A análise dos balanços hídricos dos anos em estudo, comparativamente com as imagens, ilustram que a vegetação não sofre com a deficiência hídrica do solo de maneira uniforme. A vegetação de estrato herbáceo tem seu processo de fotossíntese mais prejudicado do que as de estratos arbustivo e arbóreo, em função de seu sistema radicular pequeno que a impede de captar água em níveis mais profundos de solo.

Sendo assim, conclui-se que é possível identificar os diferentes estratos vegetativos por meio do CO₂flux. Por conseqüência, é possível identificar áreas de interceptação, infiltração e geração de escoamento superficial.

2.3 Análise Discriminante

Conhecer o clima local é um fator importante para planejar o manejo dos recursos hídricos, haja vista que vários elementos meteorológicos estão inseridos no ciclo hidrológico (MEDEIROS ET AL., 2013). Esses elementos meteorológicos podem sofrer oscilações de um ano para o outro.

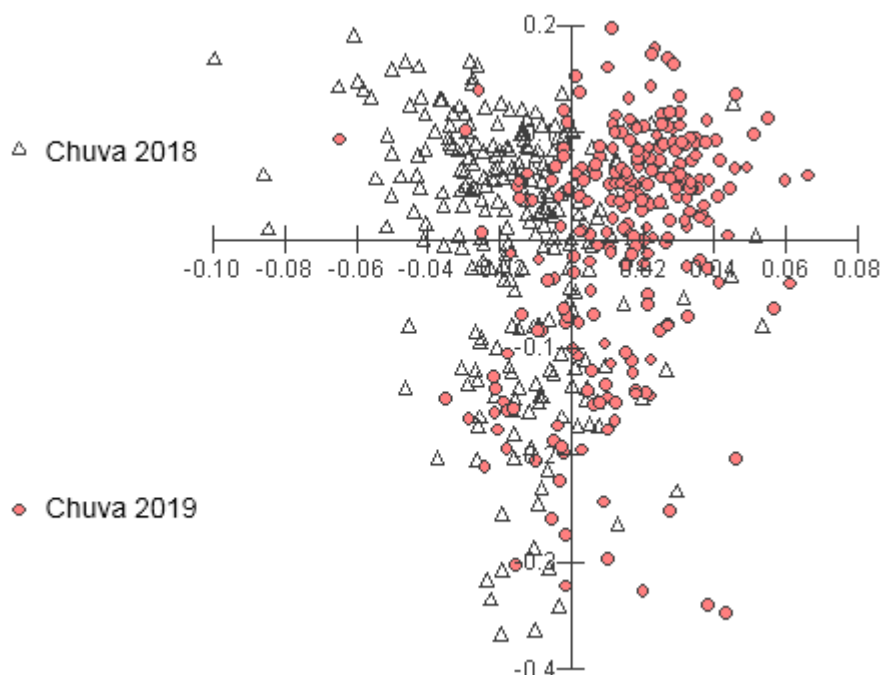
Neste caso esta análise foi utilizada para verificar a separabilidade de dois grupos combinados (seca e chuva; 2018 e 2019) em função das variáveis NDVI, sPRI e CO₂flux. Tais variáveis derivam dos níveis de atividade fotossintética e sequestro de carbono pela vegetação nos diferentes períodos de cada ano. Após a entrada dos

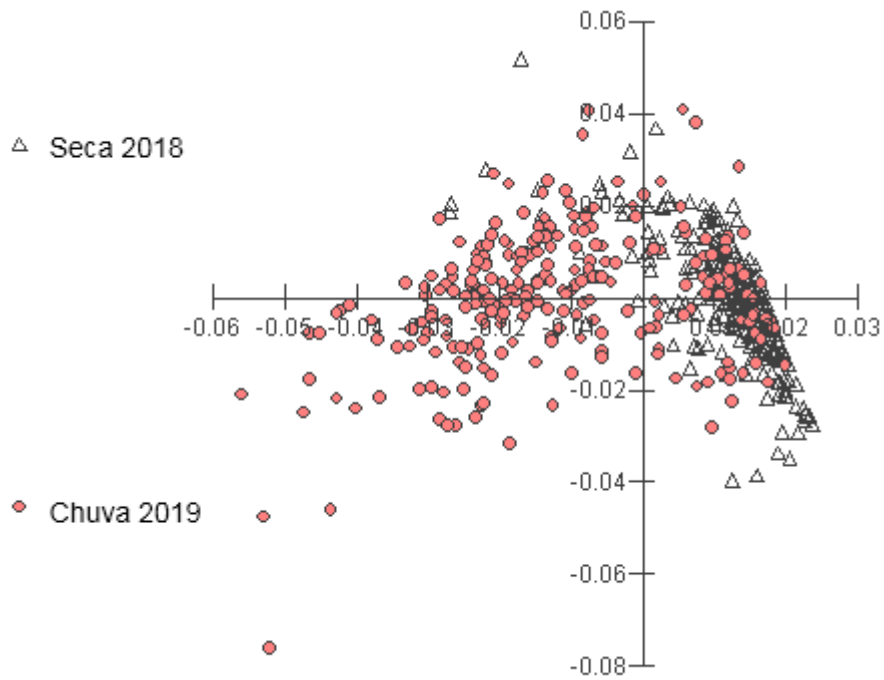
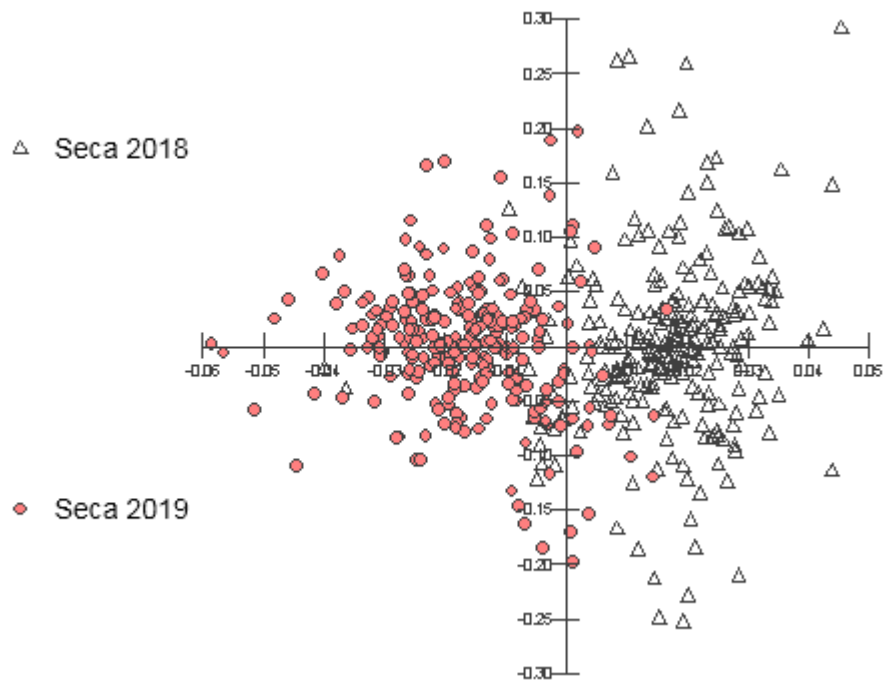
dados no software, este gera as funções discriminantes, que por sua vez geram os gráficos de distribuição. As funções e coeficientes de discriminação obtidos para a separação dos grupos combinados estão dispostos na Tabela 1.

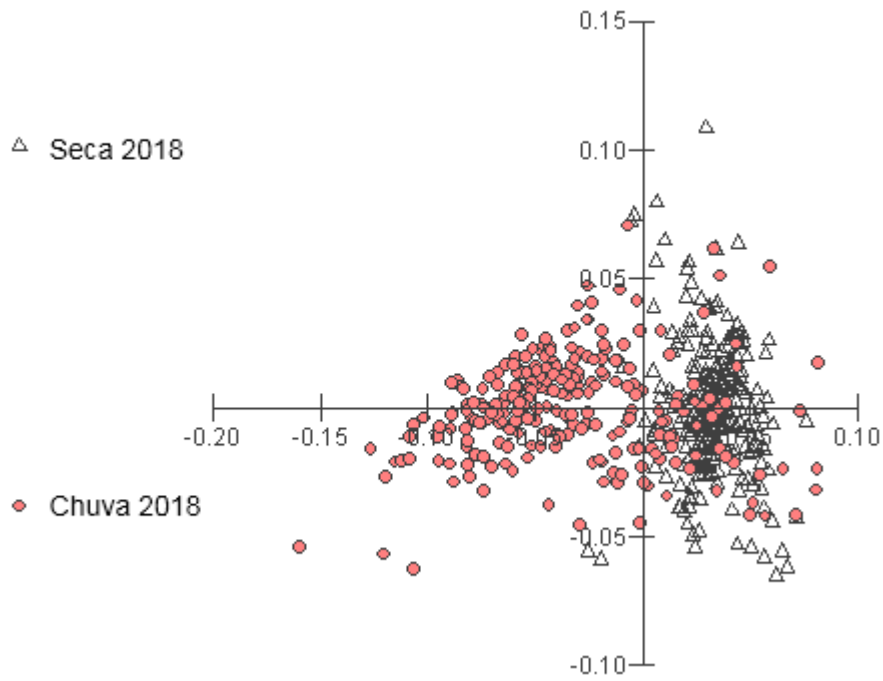
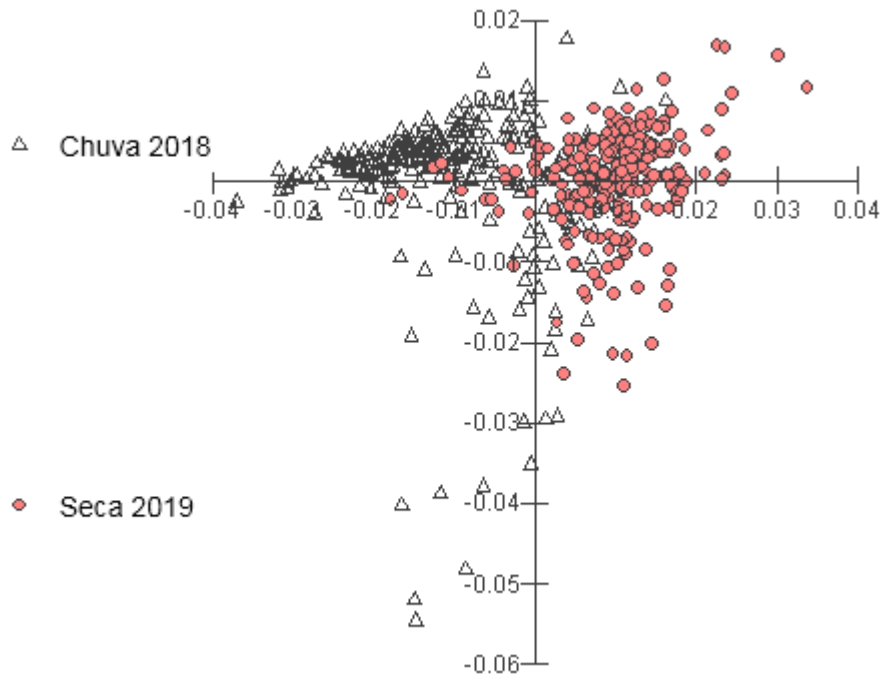
GRUPOS	Função Discriminante	Coefficiente de Discriminação
Grupo 1: CHUVA 2018 Grupo 2: CHUVA 2019	Y1 = 0.8591 X1 - 0.0100 X2 + 0.5117 X3 Y2 = 0.2365 X1 + 0.7694 X2 - 0.1566 X3	0,8
Grupo 1: SECA 2018 Grupo 2: SECA 2019	Y1 = 0.8454 X1 - 0.1325 X2 + 0.5175 X3 Y2 = 0.0769 X1 + 0.2554 X2 + 0.9638 X3	0,91
Grupo 1: SECA 2018 Grupo 2: CHUVA 2019	Y1 = -0.2646 X1 - 0.4425 X2 + 0.8568 X3 Y2 = 0.4534 X1 - 0.2389 X2 + 0.8587 X3	0,83
Grupo 1: CHUVA 2018 Grupo 2: SECA 2019	Y1 = -0.5982 X1 - 0.3871 X2 + 0.7017 X3 Y2 = -0.6329 X1 - 0.3091 X2 + 0.7099 X3	0,86
Grupo 1: SECA 2018 Grupo 2: CHUVA 2018	Y1 = 0.9214 X1 - 0.1373 X2 + 0.3635 X3 Y2 = 0.8889 X1 + 0.1324 X2 + 0.3306 X3	0,88
Grupo 1: SECA 2019 Grupo 2: CHUVA 2019	Y1 = 0.7769 X1 + 0.3578 X2 - 0.5180 X3 Y2 = 0.7918 X1 + 0.2296 X2 - 0.5660 X3	0,91

Tabela 1: Funções discriminantes e coeficientes de discriminação

Pode-se observar nos resultados apresentados na Tabela 1 que, em geral, os coeficientes são altos em todas as combinações de análises. O comportamento da vegetação tem uma resposta forte em relação a sazonalidade do clima da área de estudo, por isso os índices espectrais conseguem captar as diferenças entre o nível de sequestro de carbono pelas plantas nos períodos de estiagem e de chuva. Os gráficos da Figura 13 ilustram a dispersão dos valores em relação às combinações analisadas.







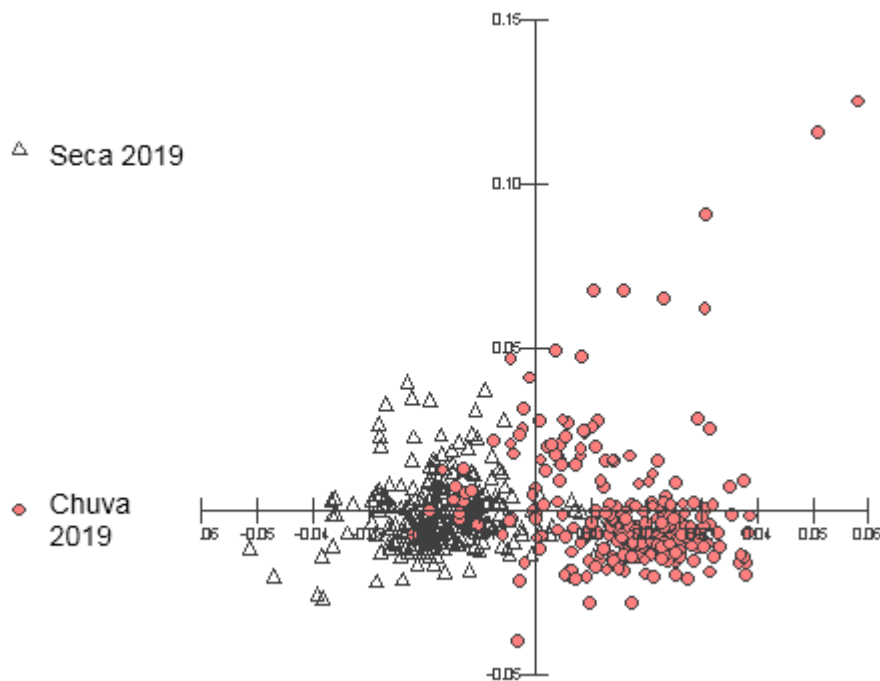


Figura 13 – Gráficos de distribuição da análise discriminante

Entretanto, ainda que a combinação seja entre um período chuvoso e outro período chuvoso (ou também, seco e seco) o coeficiente expressa um alto índice de discriminação. Este resultado decorre das oscilações climáticas entre ciclos anuais que, apesar de apresentarem um padrão temporal, demonstram nuances individuais para cada ano observado.

A distribuição espacial da vegetação é determinada pela interação de fatores abióticos e bióticos do ambiente (clima, solo, geomorfologia e fauna) e o equilíbrio dinâmico existente entre vegetação e clima regional pode ser alterado se um desses componentes variar. Sazonalmente, essa variação causa oscilações na população vegetal, proporcionando certa mudança fenológica sobre as características vegetais (NUNES ET AL., 2012).

Ao analisar seca 2018 *versus* seca 2019, por exemplo, é possível perceber o elevado coeficiente de discriminação (0,9). Este resultado possivelmente está relacionado com o fenômeno de seca intensa ocorrido em 2018 que levou a vegetação a uma atividade fotossintética inferior a do ano de 2019 no mesmo período.

Nunes et al. (2012) obtiveram resultado relacionado ao investigar fitofisionomias na Amazônia Central. Segundo os autores, foi possível a discriminação de populações vegetativas se utilizando de índices de vegetação, determinando a

sensibilidade destes índices às características estruturais e fisionômicas em Floresta Tropical.

Santos (2017) atestou a potencialidade do CO₂flux para a verificação dos níveis de sequestro de carbono em áreas de caatinga preservada e em regeneração se utilizando da correlação do índice CO₂flux com *footprint* de carbono obtido por medição em torres micrometeorológicas. O autor constatou que na área de Caatinga preservada, os valores obtidos pelo CO₂flux (pixel) e o *footprint* responderam de forma semelhante e que, em áreas de caatinga em regeneração, embora tenha apresentado um padrão de resposta também semelhante, foi possível verificar pequenas variações em relação a área preservada. Isso decorre das maiores diferenças (menor homogeneidade) dos pixels na área com menor densidade de vegetação (em regeneração), tanto em período chuvoso, como seco, as quais são captadas pelo sistema sensor e traduzidas pelo índice de vegetação utilizado.

A dinâmica da vegetação natural é uma variável importante nos modelos dedicados ao entendimento da variabilidade interanual de ecossistemas terrestres, quando se estudam as trocas de carbono e interações biosfera/clima (ZHANG ET AL., 2003). Nesse sentido, é razoável concluir que o comportamento da vegetação está relacionado a fatores climáticos que determinam o saldo do balanço hídrico, o qual neste caso foi possível observar que diferiu de um ano para outro.

3. CONCLUSÃO

Os valores de CO₂flux aumentam conforme aumenta o porte da vegetação. Apesar da vegetação herbácea se confundir com solo exposto e algumas vezes ter maior valor em período de seca do que em período chuvoso, seu valor não ultrapassou 0,2 em nenhum dos casos analisados, o que indica que foi possível identificar áreas potenciais de infiltração a partir dos dados de CO₂flux.

Entretanto, a fisiologia vegetal de cada espécie de vegetação influencia diretamente no comportamento dos indivíduos em diferentes períodos. Fatores como densidade do dossel, profundidade do sistema radicular e resistência a períodos de estiagem devem ser levados em consideração ao se utilizar desta metodologia para análise da eficiência do sequestro de carbono. Além de, claro, características e padrões climáticos locais, pois, como visto, a sazonalidade pode ser um ponto crucial para a análise da resposta espectral da vegetação.

O campus Darcy Ribeiro da UnB é um espaço urbano e vivo, sendo assim, está sujeito a modificações no espaço a qualquer tempo. A ocorrência de obras, como a construção de novos prédios ou reformas pontuais, por exemplo, pode interferir na análise de imagens advindas de sensoriamento remoto a depender da data de aquisição.

Visto isso, diversas variáveis devem ser levadas em consideração. A análise deve ser feita de acordo com as características do local estudado – uma área de preservação mostrará diferentes nuances em relação a uma área urbana heterogênea, ou mesmo a uma área em regeneração.

A metodologia do CO2flux, aplicada por meio do uso de dados Planet, permitiu atingir os objetivos deste trabalho. Foram obtidas respostas satisfatórias na identificação de áreas de infiltração, interceptação e geração de escoamento superficial ao analisar o todo comparativamente aos dados pixel a pixel. Permitiu ainda correlacionar o balanço hídrico anual ao comportamento da vegetação frente a variações sazonais, possibilitando a visualização e entendimento da resposta da vegetação a eventos de excedente e deficiência hídrica do solo.

De acordo com os os resultados apresentados, a hipótese da potencialidade dos dados Planet para identificação dos elementos do ciclo hidrológico pôde ser comprovada. Nesse sentido, foi atestada mais essa utilidade como contribuição deste trabalho a pesquisas futuras em temas afins.

4. REFERÊNCIAS

- AATI, Saif, AVOUAC, Jean-Philippe. Optimization of Optical Image Geometric Modeling, Application to Topography Extraction and Topographic Change Measurements Using PlanetScope and SkySat Imagery. *Remote Sensing*. Califórnia, USA. 2020. doi:10.3390/rs12203418.
- ANA. Agência Nacional de Águas, Brasil. Hidrologia básica 1. Unid 1, 1–55, 2009.
- BAPTISTA, Gustavo M. de M. Validação da modelagem de sequestro de carbono para ambientes tropicais de cerrado, por meio dos dados AVIRIS e HYPERION. XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 1037–1044, 2003.
- BATISTA, L. V., GASTMANS, D., SÁNCHEZ-MURILLO, R., FARINHA, B. S., dos SANTOS, S. M. R. e KIANG, C. H. Groundwater and surface water connectivity within the recharge area of Guarani aquifer system during El Niño 2014–2016. *Hydrological Processes*, 32(16), 2483–2495, 2018. <https://doi.org/10.1002/hyp.13211>
- BECERRA, Jorge Alberto B., CARVALHO, Suzana, SILVA, Emily Ane D. da, MARTINS, Iris Amati, VON RANDOW, Celso. Variabilidade sazonal do clima e da vegetação no bioma Cerrado: I. Abordagem diagnóstica por sensoriamento remoto. XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia, CBMET. 2010. DOI: 10.13140/RG.2.1.3121.0406.
- Centro de Planejamento Oscar Niemeyer (CEPLAN). 2020. http://www.ceplan.unb.br/index.php?option=com_content&view=article&id=17&Itemid=693.
- DA ROCHA, H. R., MANZI, A. O., CABRAL, O. M., MILLER, S. D., GOULDEN, M. L., SALESKA, S. R., COUPE, N. R., WOFSY, S. C., BORMA, L. S., ARTAXO, R., VOURLITIS, G., NOGUEIRA, J. S., CARDOSO, F. L., NOBRE, A. D., KRUIJT, B., FREITAS, H. C., VON RANDOW, C., AGUIAR, R. G. e MAIA, J. F. Patterns of water and heat flux across a biome gradient from tropical forest to savanna in Brazil. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 114(1), 1–8. 2009. <https://doi.org/10.1029/2007JG000640>.
- DISTRITO FEDERAL. Zoneamento Ecológico Econômico/DF. Caderno Técnico, Pré-Zoneamento: Disponibilidade Hídrica no Distrito Federal e o Ordenamento Territorial. 2015. Disponível em: <http://www.zee.df.gov.br>.
- EL-MEZOUAR, C., TALEB, N., KPALMA, K. & RONSIN, J. Vegetation extraction from IKONOS imagery using high spatial resolution index. *Journal of Applied Remote Sensing*, 5(1), 0535431, 2011. <https://doi.org/10.1117/1.3624518>.
- FRANCINI, Saverio, MCROBERTS, Ronald E, GIANNETTI, Francesca, MENCUCCI, Marco, MARCHETTI, Marco, SCARASCIA MUGNOZZA, Giuseppe & CHIRICI, Gherardo. Near-real time forest change detection using PlanetScope imagery. *European Journal of Remote Sensing*. 2020. DOI: 10.1080/22797254.2020.1806734.
- FRITZEN, M., & BINDA, A. L. Alterações No Ciclo Hidrológico Em Áreas Urbanas: Cidade, Hidrologia e Impactos no ambiente. *Ateliê Geográfico*, 5(3), 239–254, 2011. <https://doi.org/10.5216/ag.v5i3.16703>.
- GAŠPAROVIĆ, M., MEDAK, D., PILAŠ, I., JURJEVIĆ, L., BALENOVIĆ, I. Fusion Of Sentinel-2 And Planetscope Imagery For Vegetation Detection And Monitoring. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Mid-term Symposium “Innovative Sensing – From Sensors to

Methods and Applications". Karlsruhe, Germany, v. XLII-1, p. 155-160. 2018.
<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-1-155-2018>.

KINYANJUI, M. J. NDVI-based vegetation monitoring in Mau forest complex, Kenya. *African Journal of Ecology*, 49(2), 165–174, 2011. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2028.2010.01251.x>.

KOKHAN, Svitlana e VOSTOKOV, Anatoliy. Application of nanosatellites PlanetScope data to monitor crop growth. *E3S Web of Conferences* 171, 02014, 2020. Ucrânia. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017102014>.

LORZ, C., ABBT-BRAUN, G., BAKKER, F., BORGES, P., BO"RNICK, H., FORTES, L., FRIMMEL, F. H., GAFFRON, A., HEBBEN, N., HO"FER, R., MAKESCHIN, F., NEDER, K., ROIG, L. H., STEINIGER, B., STRAUCH, M., WALDE, D., WEI"ß, H., WORCH, E., WUMMEL, J. Challenges of an integrated water resource management for the Distrito Federal, Western Central Brazil: climate, land-use and water resources. *Environmental Earth Sciences*, 65:1575–1586. 2011. DOI: 10.1007/s12665-011-1219-1.

MEDEIROS, R. M. DE; SANTOS, D. C. DOS; SOUSA, F. DE A. S. DE; GOMES FILHO, M. F. Análise Climatológica, Classificação Climática e Variabilidade do Balanço Hídrico Climatológico na Bacia do Rio Uruçui Preto, PI. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 6 (4), 652–664, 2013.

MEILI, Naika, MANOLI, Gabriele, BURLANDO, Paolo, BOU-ZEID, Elie, CHOW, Winston T. L., COUTTS, Andrew M., DALY, Edoardo, NICE, Kerry A., ROTH, Matthias, TAPPER, Nigel J., VELASCO, Erik, VIVONI, Enrique R. e FATICHI, Simone. An urban ecohydrological model to quantify the effect of vegetation on urban climate and hydrology (UT&C v1.0). *Geoscientific Model Development*, 13, 335–362, 2020. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-335-2020>.

MOURA, Albert Einstein S. S. de, CORREA, Marcus M., SILVA, Elcides R. da, FERREIRA, Rinaldo Luiz C., FIGUEIREDO, Adriana de C. e POSSAS, José Marcelo C. Interceptação Das Chuvas Em Um Fragmento De Floresta Da Mata Atlântica Na Bacia Do Prata, Recife, Pe. *Revista Árvore*, Viçosa-MG, v.33, n.3, p.461-469, 2009.

NUNES, G.M.; SOUZA FILHO, C.R.; FERREIRA, L.G. Discriminação De Fitofisionomias Na Amazônia Central Por Meio De Índices De Vegetação De Imagens Com Resolução Espacial Moderada. *Revista de Geografia Acadêmica* v.6, n.1. 5 – 14. 2012.

PEDROZA DA SILVA, S. C. Modelagem Espectral Para Determinação Da Concentração E Fluxo De CO₂ Em Paisagens Naturais E Antrópicas Na Região Amazônica. 173p. Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (UnB). 2014.

PEREIRA, A. Simplificado o balanço hídrico de Thornthwaite-Mather. *Bragantia*, 64(2),311-313. 2005

PLANET. Daily Satellite Imagery and Insights. Our Constellations. <https://www.planet.com/>. Agosto, 2020.

RAHMAN, A., GAMON, J., FUENTES, D., ROBERTS, D., PRENTISS, D., & QIU, H. Modeling CO₂ flux of boreal forests using narrow-band indices from AVIRIS imagery. AVIRIS Workshop, JPL/NASA, Pasadena, California., 8p. 2000.

- ROLIM, G., SENTELHAS, P., & BARBIERE, V. Planilhas no ambiente excel para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 6(1), 133–137. <http://coral.ufsm.br/rba/t13313761.html>. 1998.
- SANO, E. E., PONZONI, F. G., BAPTISTA, G. M. M., TONIOL, A. C., GALVÃO, L. S. e ROCHA, W. J. S. F. Reflectância da Vegetação. In: MENESES, Paulo Roberto et al. *Reflectância dos Materiais Terrestres*. Brasília: Oficina de Textos. Cap. 6. p. 189-223. 2019.
- SANTOS, C. V. B. dos. Modelagem espectral para determinação de fluxo de CO₂ em áreas de caatinga preservada e em regeneração. Dissertação. Universidade Estadual de Feira de Santana. Programa de Pós-Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente. 75p. 2017.
- SONG, T., e WANG, Y. Carbon dioxide fluxes from an urban area in Beijing. *Atmospheric Research*, 106, 139–149, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.12.001>.
- SOUZA, Fernanda A. O. de, SILVA, Cícero L. da, MAGGIOTTO, Selma R. & OLIVEIRA JÚNIOR, Manuel P. de. Caracterização das vazões em uma pequena bacia hidrográfica do Distrito Federal, Brasil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* v.16, n.1, p.10–17, 2012. Campina Grande, PB.
- SOUZA, G. M. DE, GURGEL, H. C. DA, e CIAMP, P. M. Análise Sazonal Da Vegetação Do Cerrado Por Meio De Dados Do Sensor Modis No Distrito Federal. *Boletim Goiano de Geografia*, 36(3), 502. 2016. <https://doi.org/10.5216/bgg.v36i3.44555>
- SOUZA, S. O., CORREA, W. de S. C., FILETI, R. B. e VALE, C. C. do. Balanço Hídrico da Bacia Hidrográfica do Rio Caravelas (BA) como Subsídio ao Planejamento Agrícola. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v.07, n.01, 83–92. 2014.
- STEENHUIS, T. S., e VAN DER MOLEN, W. H. The Thornthwaite-Mather procedure as a simple engineering method to predict recharge. *Journal of Hydrology*, 84(3–4), 221–229. 1986. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(86\)90124-1](https://doi.org/10.1016/0022-1694(86)90124-1)
- TUCCI, C. Impactos da variabilidade climática e do uso do solo nos recursos hídricos. Câmara Temática sobre Recursos Hídricos do Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas. ANA – Agência Nacional de Águas. 2002.
- VARELLA, C. Análise Multivariada Aplicada As Ciências Agrárias. Pós-Graduação Em Agronomia Ciência Do Solo: Cpga-Cs. <http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/varella/Downloads/multivariadaaplicadaasciencias agrarias/Aulas/ANALISE DISCRIMINANTE.pdf>. 2004.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Visto o papel desempenhado pela vegetação no ciclo da água, fica claro que o estudo de sua distribuição pode contribuir para o gerenciamento de recursos hídricos de ambientes urbanos. A utilização de técnicas de sensoriamento remoto com imagens Planet possibilitou identificar a ocorrência, distribuição e comportamento da vegetação no campus Darcy Ribeiro, bem como a obtenção e extração de dados úteis ao monitoramento dessa vegetação em relação a sazonalidade climática local, atestando a potencialidade dessas imagens para estudo da vegetação urbana.

A análise discriminante obteve forte coeficiente quanto a diferenciação da vegetação em diferentes combinações de anos e períodos, sendo assim, parece coerente concluir que tanto o balanço hídrico foi diferente de um ano para o outro, quanto que a resposta da vegetação é bastante marcada por essas oscilações.

Em relação aos objetivos geral e específicos e a hipótese deste trabalho, conclui-se que:

1. Foi possível identificar os elementos do ciclo hidrológico por meio do CO₂flux e dados Planet, atestando a potencialidade dessas imagens;
2. Em função do comportamento da vegetação em diferentes estratos frente a sazonalidade climática, foi possível verificar áreas de vegetação arbórea (interceptação), vegetação herbácea (infiltração) e áreas impermeabilizadas (escoamento superficial), a partir da análise do sequestro de carbono pela vegetação;
3. A correlação entre o balanço hídrico anual e comportamento da vegetação em relação a sazonalidade foi demonstrada por meio da análise dos momentos de estresse hídrico da planta e a deficiência de água no solo.

É importante ressaltar que fatores como o clima, o bioma e a fisiologia da vegetação devem ser levados em consideração com o intuito de tornar as análises mais precisas, visto que o comportamento da vegetação frente ao balanço hídrico está intimamente relacionado a esses fatores.

Trabalhos futuros devem ser desenvolvidos visando aprofundar a análise da vegetação com o CO₂flux em ambiente de cerrado se utilizando de dados de campo.