



CÁLCULO DO ÍNDICE ESPECTRAL CO₂FLUX EM ÁREA DE MATA ATLÂNTICA E SUA RELAÇÃO COM PROCESSOS GRAVITACIONAIS NO MUNICÍPIO DE CUBATÃO

Saulo Oliveira Folharini^(a), Regina Célia de Oliveira^(b)

^(a) Departamento de Geografia/Universidade Estadual de Campinas, Email: sfolharini@gmail.com

^(b) Departamento de Geografia/Universidade Estadual de Campinas, Email: reginacoliveira@ige.unicamp.br

Eixo: GEOTECNOLOGIAS E MODELAGEM ESPACIAL EM GEOGRAFIA FÍSICA

Resumo

A análise da paisagem tem, entre seus objetivos, compreender como a mesma evolui e qual a interferência do homem em sua dinâmica. Nesse sentido, esforços de pesquisadores têm sido feitos em compreender os motivos da elevação da temperatura terrestre e uma maneira de mensurá-la é através do carbono. O presente estudo, se propõe, através do processamento digital de imagens de satélite e metodologias já consolidadas, mensurar o estoque de carbono na vegetação do município de Cubatão-SP, relacionando-o a processos gravitacionais. Para tanto é necessário considerar que a vegetação contribui na estabilidade das vertentes. A metodologia empregada nesse estudo gerou o CO₂flux, índice espectral que utiliza outros dois índices espectrais NDVI e sPRI, na mensuração do estoque de carbono. Os resultados foram satisfatórios, identificando áreas de declividade elevada onde o CO₂flux têm valores altos, que indicam uma maior estabilidade na dinâmica de evolução das vertentes.

Palavras chave: CO₂flux, Declividade, Serra do Mar, Processos Gravitacionais, Carbono.

1. Introdução

Nas últimas décadas as técnicas de sensoriamento remoto têm sido essenciais para realizar o monitoramento e mapeamento dos recursos naturais. Utilizando imagens orbitais é possível ter uma ampla visão regional, o que permite diagnosticar a dinâmica da paisagem em escala temporal e espacial.

A diversidade de possibilidades de utilização de imagens orbitais é o que as torna atrativas para os estudos sobre o ambiente. Com o desenvolvimento de novos sensores, as resoluções espacial, espectral e temporal foram ampliadas, resultando em sua utilização em diferentes campos da ciência. Nos dias atuais, as imagens orbitais são fundamentais em estudos geográficos, possibilitando a compreensão das mudanças que ocorreram no cenário ambiental ou social ao identificar as alterações no uso das terras.

Uma informação possível de ser obtida das imagens orbitais são os índices de vegetação, amplamente utilizados em estudos com foco na cobertura vegetal, esses índices traduzem medidas radiométricas que indicam a atividade da vegetação, a porcentagem de cobertura verde, o teor de clorofila, a biomassa verde presente e a radiação fotossinteticamente absorvida (APAR) (JENSEN, 2009).



Estudos de Baptista (2003), Cerqueira e Rocha (2007) e Rahman et al. (2001) salientam que os índices de vegetação podem ser utilizados além da estimativa de biomassa, para identificar o carbono estocado na vegetação. Para tanto, dois índices, são utilizados para essa estimativa.

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index*, NDVI), desenvolvido e proposto por Rouse et al. (1974), calculado utilizando a reflectância das bandas do vermelho e infravermelho próximo. Tem sido empregado em estudos que visam investigar a atividade fotossintética de culturas agrícolas e da vegetação natural, mapear uso e cobertura do solo, desmatamentos florestais, mudanças climáticas, entre outros (PONZONI; SHIMABUKURO; KUPLICH, 2012).

Já o Índice de Vegetação Fotossintético (*Photochemical Reflectance Index*, PRI), desenvolvido por Rahman et al. (2000), mensura a eficiência do uso da luz no processo de fotossíntese e é calculado utilizando a reflectância das bandas verde e azul.

Segundo Rahman et al (2000) o sequestro de carbono pela vegetação depende da integração do NDVI com PRI gerando um novo índice, o CO₂flux, desenvolvido com objetivo de mensurar o estoque de carbono em vegetação natural.

Ao estocar carbono a vegetação ajuda a minimizar os efeitos do impacto do dióxido de carbono (CO₂) no meio ambiente, além de ser fundamental no processo de fotossíntese.

Já no solo, o carbono melhora a estrutura e agregação dos componentes que o formam. Em subsuperfície as fraturas e juntas existentes no relevo íngreme, são fatores condicionantes para desencadeamento de processos gravitacionais e a vegetação tem papel na interceptação da precipitação, minimizando os efeitos de desagregação que a água causa no solo (BIGARELLA, 2007).

Neste contexto, a vegetação tem papel importante na estabilidade das vertentes que evoluem de acordo com processos gravitacionais, relacionados à inclinação, espessura e coesão dos constituintes do solo, formando uma estrutura sólida e dando estabilidade a vertente. A principal ligação entre a estabilidade das vertentes e os processos do ecossistema florestal é a alocação de carbono no solo através da rede de raízes que contribuem para a coesão e resistência, por isso a vegetação tem papel fundamental na estabilidade dessas áreas e deve ser considerada como um dos principais componentes no estudo de estabilidade de vertentes (BAND et al., 2012).

A vegetação contribuindo na estabilidade das vertentes, alocando carbono no solo e desenvolvendo a rede de raízes, tem papel de grande importância na estabilidade de áreas declivosas acima de 30° onde, de acordo com Bitar, Freitas e Ferreira (2012), a ocupação deve ser evitada ou proibida. Esse é a primeira justificativa para escolha dessas áreas no município de Cubatão-SP.



A segunda justificativa baseia-se na delimitação de parâmetros à processos geomorfológicos na Serra do Mar proposta por Gigliotti, Gobbi e Bacci (2014). Esses processos sofrem influência direta da declividade, os autores definem três parâmetros básicos para sua ocorrência: 1) em áreas de declividades baixas a médias e níveis altimétricos entre 20 e 80 metros, sopé da Serra do Mar, ocorrem movimentos de massa e depósitos gravitacionais; 2) em áreas de declividades altas, com níveis altimétricos superiores a 80 metros, escarpas da Serra do Mar, ocorrem rolamentos de blocos; 3) áreas com proximidade de até 30 metros de canais de drenagem são susceptíveis a inundações e corridas de lama.

Considerando essas duas justificativas, o objetivo desse estudo é calcular o índice CO₂flux para toda área do município de Cubatão-SP, dando ênfase as áreas com declividade acima de 30°, que tem históricos de processos gravitacionais devido a ocupação avançar em direção a Serra do Mar. Os eventos de maiores proporções ocorreram nos bairros Cotas no final da década de 1970 e na Casa de Força de Cubatão em 1947 (GUTJAHR et al., 2010; SANTOS, SILVA e NOUH, 2009).

2. Metodologia

2.1 Área de estudo

O município de Cubatão (figura 1) localiza-se na região administrativa da Baixada Santista, Estado de São Paulo. De acordo com a estimativa de população do IBGE, em 2016 o município contava com 127.887 habitantes, área de 142.879 km² e uma densidade populacional de 895,07 hab/km² e coordenadas geográficas latitude: 23° 53' 42" S e longitude: 46° 25' 31" W.

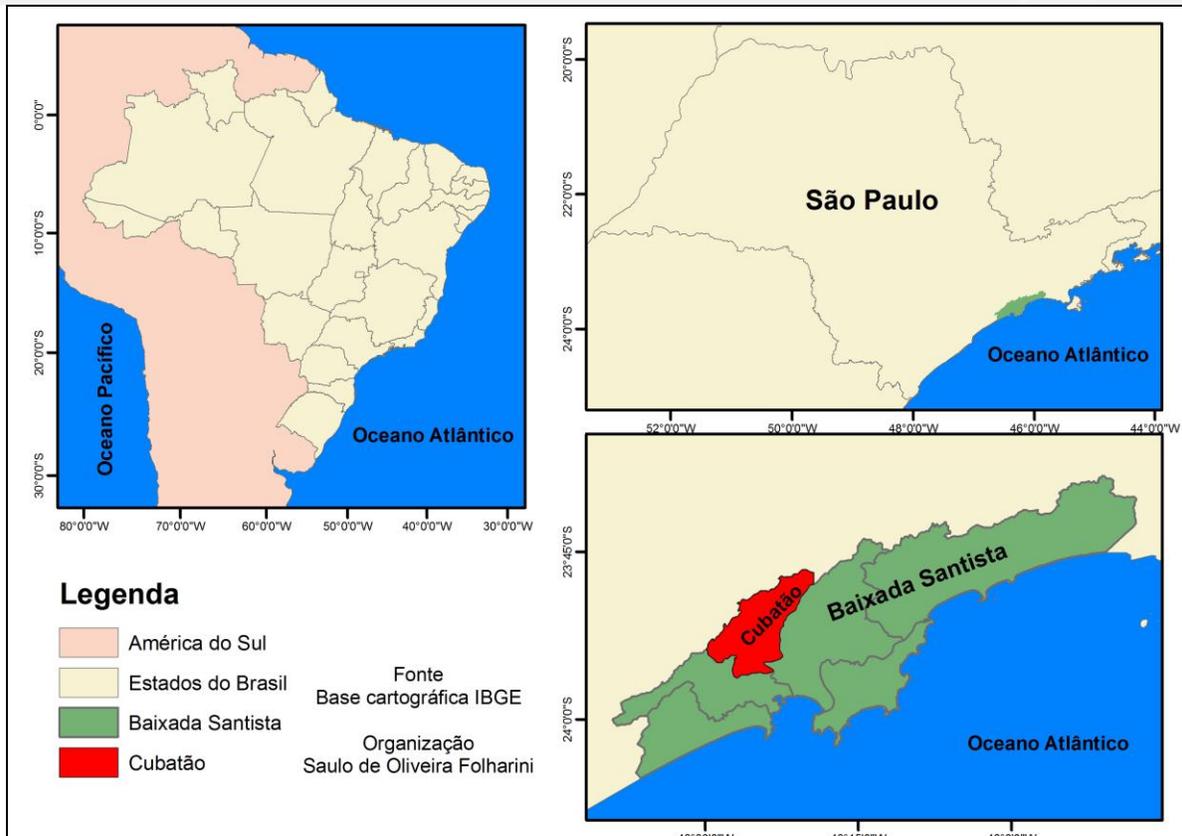


Figura 1: Localização da área de estudo.

A ocupação do município, a partir da segunda metade do século XX, possui intrínseca relação com a indústria de base, como siderúrgicas e refinarias. Sua proximidade com o porto de Santos e a metrópole paulista impulsionam o desenvolvimento industrial do município com muita intensidade, o que acarretou em sérios danos ao meio ambiente devido a poluição causada por indústrias poluidoras (CUBATÃO, 2014).

2.2 Processamento de imagens

A cena do satélite LANDSAT 8, sensor OLI, órbita/ponto: 219/76, data 02 jul. 2014, foi adquirida com correção geométrica e convertidas para reflectância, no site do U. S. Geological Survey (<http://earthexplorer.usgs.gov>). A escolha dessa data de imagem, justifica-se pela inexistência de nuvens no dia de sua obtenção pelo satélite, circunstância dificultada pela presença constante de nuvens na região.

Após o download a cena passou pelas seguintes etapas de pré-processamento no software ENVI, versão 5.1:



1. Empilhamento das bandas 2 (azul), 3 (verde), 4 (vermelho), 5 (infravermelho próximo);
2. Reprojeção para o Hemisfério Sul;
3. Recorte da área de estudo.

Com a etapa de pré-processamento concluída, iniciou-se a etapa de processamento das imagens com objetivo de gerar os índices espectrais NDVI, PRI e CO2flux. Nessa etapa foi utilizado o módulo Spectral Match no ENVI.

Para o cálculo do NDVI são empregadas as bandas do vermelho (V), utilizada pela vegetação durante o processo de fotossíntese, e do infravermelho (IV), refletida durante o mesmo processo. O índice é calculado com base na relação entre o vermelho e o infravermelho próximo e seu valor varia entre -1 e 1. Quanto maior esse valor, maior a atividade fotossintética da vegetação (Equação 1):

Equação 1: NDVI.

$$NDVI = \frac{IV - V}{IV + V}$$

O mapeamento da vegetação utilizando o NDVI permite estimar a biomassa da vegetação e consequentemente relacioná-lo ao estoque de carbono (COLTRI et al., 2009).

Em seguida, foi gerado o índice PRI que mensura os pigmentos de carotenoides (entre eles a xantofila) da folhagem. Esses pigmentos indicam o quanto a luz fotossintética é eficiente ou a taxa armazenada de dióxido de carbono na folhagem. Tal índice é utilizado em estudos de estresse e produtividade da vegetação. O índice é calculado com base na relação entre as bandas azul (A) e verde (Ve) e seu valor varia entre -1 e 1 (Equação 2):

Equação 2: PRI.

$$PRI = \frac{A - Ve}{A + Ve}$$

Já Rahman et al (2000) salientam que o índice PRI pode ser relacionado a eficiência do uso da luz no processo fotossintético. Entretanto, os valores do índice PRI precisam ser reescalados para valores positivos, utilizados no cálculo de sequestro de carbono. Esse novo índice é denominado sPRI e varia entre 0 e 1 (BAPTISTA, 2004, 2003) (Equação 3):



Equação 3: sPRI.

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

O reescalonamento do índice PRI é necessário para ficar na mesma escala do NDVI e assim serem combinados (Equação 4) através de uma multiplicação gerando o CO2flux. A metodologia do CO2flux foi proposta por Rahman et al (2000).

Equação 4: CO2flux.

$$CO2flux = sPRI \times NDVI$$

Após calcular o índice CO2flux do município de Cubatão – SP, foram extraídos, através de uma máscara de declividade, os valores de CO2flux acima de 30° de declividade.

3. Resultados e Discussões

Os resultados do processamentos foram um mapa com a distribuição espacial de valores de CO2flux em áreas com declividade maior que 30° (figura 2) e um histograma de frequência com os valores observados de CO2flux.

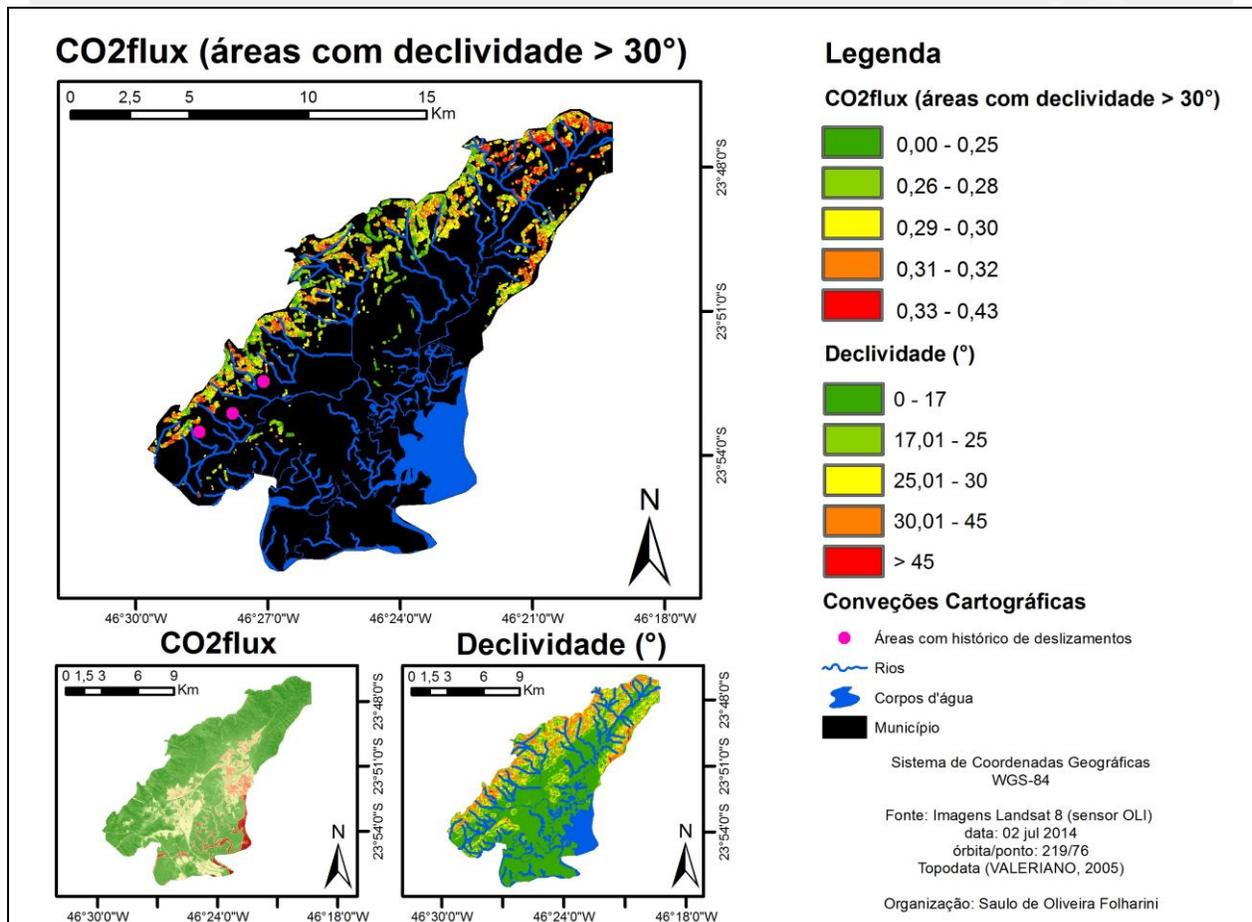


Figura 2: Dados básicos e resultado do processamento.

A área do município de Cubatão, por ser dominada por vegetação de Mata Atlântica, apresenta uma densa cobertura vegetal preservada nas áreas de encosta da Serra do Mar e intensamente alterada em áreas mais baixas do relevo, como as planícies, onde a ocupação urbana está consolidada. Por exemplo, as áreas com histórico de deslizamentos, em destaque no mapa, que identificam os locais da Casa de Força de Cubatão e os bairros Cota, próximos a esses locais os valores de CO2flux variam entre 0,31 e 0,43.

Outra área com valores elevados de CO2flux, de 0,33 a 0,43, fica a norte do município, nas áreas de cabeceira de drenagem do rio Mogi, onde ocorrem declividades acima de 45°. O vale desse rio encontra-se preservado, por estar inserido nos limites do Parque Estadual da Serra do Mar, processos gravitacionais se ocorrerem no local, são devido a evolução natural das vertentes e não devido a ocupação humana. Entretanto os valores elevados de CO2flux indicam que a vegetação é bem desenvolvida, auxiliando na estabilização das vertentes.



Ainda no vale do rio Mogi, um de seus afluentes é o rio Vermelho, com nascente em Paranapiacaba. Neste local os valores de declividade variam entre 30 e 45° e os valores de CO₂flux entre 0,26 e 0,28, também próximos a drenagem do rio Vermelho. Esses valores mais baixos de CO₂flux indicam a diversidade da cobertura vegetal, absorvendo menos CO₂ de acordo com seu porte. Isso pode ser fator importante na estabilidade da vertente, visto que o porte menor da vegetação, indica uma menor concentração de biomassa e conseqüentemente maior facilidade para a chegada de água da chuva ao solo, saturando-o com maior rapidez.

Com objetivo de complementar a análise espacial da distribuição do CO₂flux, foi organizado o histograma de frequência com o método Natural Breaks (Jenks) obtendo cinco classes (figura 3) e a distribuição dos pixels por classes (tabela I).

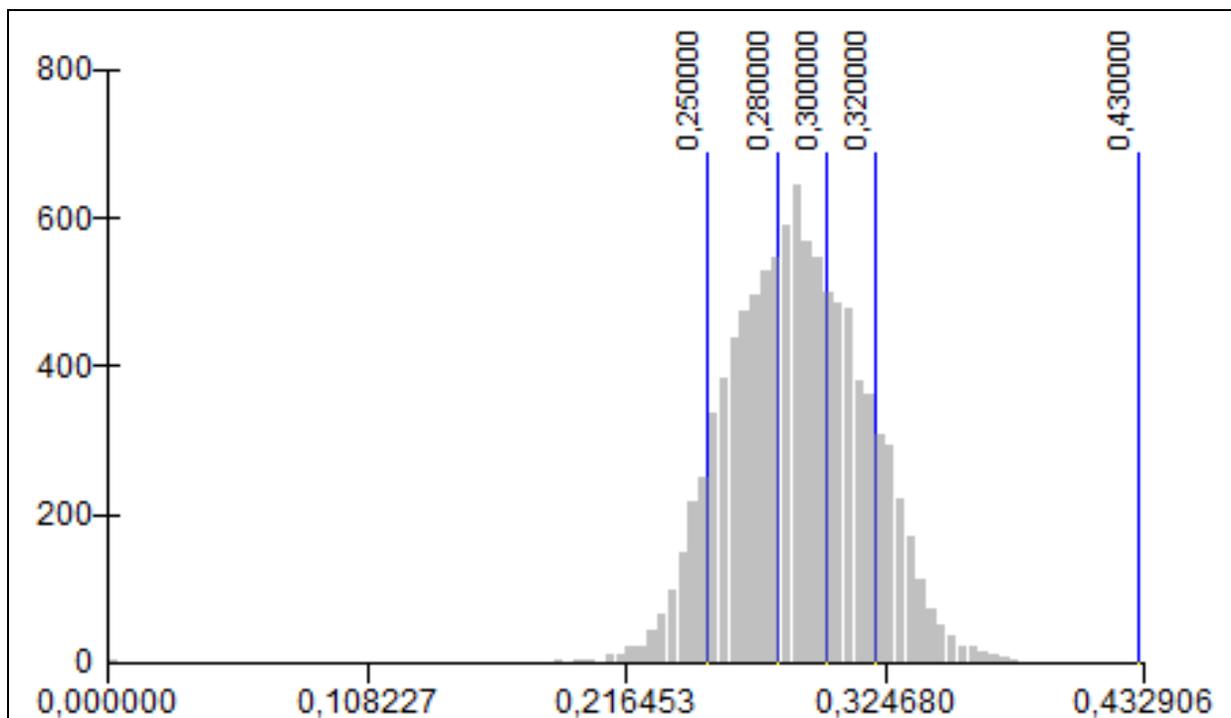


Figura 3: Histograma de frequência de CO₂flux.

Tabela 1: Distribuição dos pixels.

	Total de pixels	%



Classe 1 (0,00 a 0,25)	3011	18,4
Classe 2 (0,26 a 0,28)	6326	38,4
Classe 3 (0,29 a 0,30)	3806	23,1
Classe 4 (0,31 a 0,32)	2484	15,1
Classe 5 (0,33 a 0,43)	827	5,0
Total de pixels	16454	100

A distribuição de CO₂flux concentra-se nas classes um, dois e três, com 79,9% do total de valores, essas classes distribuem-se por toda área de estudo de forma uniforme em áreas de declividade acima de 30°.

Já as classes quatro e cinco de CO₂flux são encontradas em áreas com declividade maiores que 45°, relevo escarpado onde há predomínio de nascentes de canais de drenagem, por exemplo do rio Mogi e seus tributários.

Considerando esses resultados, conclui-se que a vegetação tem importante papel na estabilização das vertentes, visto que os processos gravitacionais nas vertentes da bacia do rio Mogi são contidos ao se comparar essa área, por exemplo, com os bairros Cota, onde a ocupação urbana avançando em direção a escarpa da Serra do Mar, suprimiu a vegetação e potencializou os processos gravitacionais que estão registrado na história do município.

Os valores de CO₂flux próximos a rios além de indicar a concentração de carbono na vegetação, também indica que essa vegetação auxilia na estabilidade da vertente minimizando o impacto da água no solo, drenando-a pelo sistema radicular da vegetação. Os valores de CO₂flux obtidos no processamento estão de acordo com outros trabalhos já realizados sobre a temática no Brasil, entre eles Silva e Baptista (2013) e Teobaldo (2013).

4. Considerações Finais

O estudo da paisagem através de imagens de satélite é amplamente difundida na atualidade. Novas metodologias de análise e mensuração de processos e/ou fenômenos ambientais são desenvolvidas de acordo com o avanço das geotecnologias.

Entre essas metodologias, a mensuração do estoque de carbono em vegetação natural através do CO₂flux, mostra-se como uma possibilidade a nível exploratório, visto que medidas in loco devem ser adicionadas a essa análise preliminar. Entretanto, os resultados desse estudo demonstram que a mensuração realizada apenas por meio digital foi satisfatório, traduzindo a realidade da distribuição da cobertura vegetal da área.



As áreas de cabeceira de drenagem no rio Mogi, onde são encontradas os maiores valores de CO₂flux, obtiveram esse resultado devido a densa cobertura vegetal preservada existente na área. Por outro lado, valores menores de CO₂flux podem ser justificados pela diversidade da vegetação que absorve mais ou menos CO₂ de acordo com seu porte.

Essa vegetação é fundamental na estabilização das vertentes, que tem na ocupação humana um dos fatores principais para desencadear processos gravitacionais. Alguns estudos já demonstram a relação direta entre esses processos e a ocupação humana, entre eles podemos citar Bonachea et al. (2010) que identificaram aumento significativo de deslizamentos de terra em relação ao avanço da ocupação no vale do Deva, Espanha e na Itália, além do aumento da frequência de desastres naturais no mundo, concluindo que o avanço da ocupação humana, principalmente a partir da década de 1980 foi responsável pelo exponencial aumento da frequência dos desastres e Remondo et al. (2005) que fazem uma análise temporal em duas escalas de tempos distintas, 100 ka e 43 anos na região da Cantabria, nordeste da Espanha, identificando os riscos a processos geomorfológicos associados a impactos humanos. A análise temporal foi uma forma de avaliar a influência do homem em processos de deslizamentos.

Esses estudos reafirmam a importância do homem nas modificações da dinâmica natural do planeta, nesse contexto, a vegetação é um dos primeiros componentes a ser modificado pela expansão dessa ocupação, que sendo predominantemente urbana, altera significativamente a dinâmica do ambiente natural onde ocorre.

5. Bibliografia

BAND, L. E.; HWANG, T.; HALES, T.C.; VOSE, J.; FORD, C. Ecosystem processes at the watershed scale: Mapping and modeling ecohydrological controls of landslides. **Geomorphology**, v. 137, p. 159–167, 2012.

BAPTISTA, G. M. M. Mapeamento do Sequestro de Carbono e de Domo Urbanos de CO₂ em Ambientes Tropicais, por meio de Sensoriamento Remoto Hiperespectral. **Geografia (Rio Claro)**, v. 29, p. 189–202, 2004.

BAPTISTA, G. M. M. D. Validação da Modelagem de sequestro de carbono para ambientes tropicais de cerrado, por meio de dados AVIRIS HYPERION. In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11 (SBSR), 2003, Belo Horizonte**. Anais...São José dos Campos: INPE, 2003. p. 1037-1044. Disponível em: http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2002/09.07.21.45/doc/10_002.pdf., 2003.

BIGARELLA, J. J. Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais. Florianópolis, SC: Editora da UFSC. 2007



BITAR, O. Y.; FREITAS, C. G. L.; FERREIRA, A. L. Classificação da declividade para fins de normalização geotécnica em planejamento urbano: estudos em áreas de domínio pré-cambriano na região sudeste. **In.: 46 Congresso Brasileiro de Geologia, 1 Congresso de Geologia de Países de Língua Portuguesa.** Santos-SP. 2012.

BONACHEA, J.; BRUSCHI, V. M.; HURTADO, M. A.; FORTE, L. M.; SILVA, M.; ETCHEVERRY, R.; CAVALLOTTO, J. L.; DANTAS, M. F.; PEJON, O. J.; ZUQUETTE, L. V.; BEZERRA, M. A. O.; REMONDO, J.; RIVAS, V.; GÓMEZ-ARZAMENA, J.; FERNÁNDEZ, G.; CENDRERO, A. Natural and human forcing in recent geomorphic change; case studies in the Rio de la Plata basin. **Science of the Total Environment**, v. 408, p. 2674–2695, 2010.

CERQUEIRA, D.B.; ROCHA, W.F. Relação entre tipos de vegetação e fluxo de CO₂ no Bioma Caatinga: Estudo de caso em Rio das Contas-BA. **In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto 13. (SBSR), 2007, Florianópolis.** Anais... São José dos Campos: INPE, 2007. p. 2413-2419. CD-ROM, On-line. ISBN 978-85-17-00031-7. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.16>>

COLTRI, P. P.; RAMIREZ, G.M.; WALTER, M.K.C.; JUNIOR, J.Z.; PINTO, H.S.; NASCIMENTO, C.R.; GONÇALVES, R.R.V. Utilização de índices de Vegetação para Estimativas não Destrutivas da Biomassa, Estoque e Sequestro de Carbono no Cafeeiro Arábica. **In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 14., 2009, Natal.** Anais... São José dos Campos: INPE, 2009. Artigos, p. 121-128. Disponível em: <http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.15.21/doc/121-128.pdf>, 2009.

CUBATÃO. **Prefeitura Municipal de Cubatão.** 2014. Disponível em <<http://www.cubatao.sp.gov.br>>, acessado em 14 jan 2017.

GIGLIOTTI, M. S.; GOBBI, E. S. ; BACCI, P. H. M. . Riscos Associados a Processos Geomorfológicos na Serra do Mar Paulista. **In: III Congresso Internacional e I Simpósio Ibero-Americano de Riscos**, 2014, Guimarães - Portugal. Multidimensão e territórios de Risco. Vilarinho - Portugal: RISCOS - Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança, 2014. p. 211-214.

GUTJAHR, M. R.; RABELLO, J. F. D.; GOMES, M. L. F.; JESUS, M. H. S. Estudos históricos de eventos climáticos extremos na Baixada Santista- SP Brasil. **In VI Seminário Latino-Americano de Geografia Física II Seminário Ibero-Americano de Geografia Física** Universidade de Coimbra, 2010.

IBGE. **Estimativa da população.** 2016. Disponível em < <http://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/> >, acessado em 14 jan 2017.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres.** São José dos Campos: Parêntese, 2009.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto da vegetação.** 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012



RAGMAN, A.F.; GAMON, J.A.; FUENTES, D.A.; ROBERTS, D.; PRENTISS, D.; QIU, H. MODELING CO₂ flux of boreal forests using narrow-band indices from AVIRIS imagery. **AVIRIS Workshop, JPL/NASA**, Pasadena, Califórnia. 2000.

RAHMAN, A.; GAMON, J.A.; FUENTES, D.A.; ROBERTS, D.A.; PRENTISS, D. Modeling distributed ecosystem flux of boreal forest using hyperspectral indices from AVIRIS imagery. **Journal of Geophysical Research**, v. 106, p. 579-591, 2001.

REMONDO, J. SOTOB, J.; GONZÁLEZ-DIÉZ, A.; TERÁN, J. R. D.; CENDREROA, A. Human impact on geomorphic processes and hazards in mountain areas in northern Spain. **Geomorphology**, v. 66, p. 69–84, 2005.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: FREDEN, S. C.; MERCANTI, E. P.; BECKER, M. (Eds.). **Third Earth Resources Technology Satellite – 1 Symposium. Volume I: Technical Presentations, NASA SP-351**. Washington, D.C.: 1974. p. 309–317.

SANTOS, A.R.; SILVA, S.G.; NOUH, J.R. Programa de recuperação socioambiental da Serra do Mar: Características Geológicas e Geotécnicas e Importância Estratégica. Os Bairros Cota. **In V Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas**. 2009.

SILVA, S. C. P.; BAPTISTA, G. M. M. Variações na modelagem do sequestro florestal de carbono por meio de dados hiperespectrais na Floresta Nacional do Tapajós, Pará. **In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 16., 2013, Foz do Iguaçu**. Anais... São José dos Campos: INPE, 2013. Artigos, p. 9020-9027. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2013/files/p0063.pdf>, 2013.

TEOBALDO, D. **Sequestro florestal de carbono e avaliação de resiliência: o caso do incêndio no Parque Nacional de Brasília em 2010**. Trabalho de Conclusão de Curso (Ciências Ambientais) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília – UnB, Brasília, 2013.