INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTUDOS FLORESTAIS
ISSN 0100-3453

Caracterização ambiental e dinâmica das plantações florestais nos municípios de Botucatu e Itatinga, Brasil

Roger Chambi-Legoas
Virginia Domínguez Castillo
Clayton Alcarde Alvares

CIRCULAR TÉCNICA

IPEF

N° 217 JUNHO 2021

www.ipef.br/publicacoes/ctecnica/

CIRCULAR TÉCNICA IPEF
n. 217, p. 01-16, junho de 2021

Caracterização ambiental e dinâmica das plantações florestais nos municípios de Botucatu e Itatinga, Brasil

Environmental characterization and dynamic of forest plantations in Botucatu and Itatinga regions, Brazil

Roger Chambi-Legoas[1], Virginia Domínguez Castillo[2], Clayton Alcarde Alvares[3]

RESUMO

As plantações florestais estão se expandindo ao longo do Estado de São Paulo, devido ao incremento da demanda por produtos de origem florestal. Estimações confiáveis das áreas de expansão e a caraterização dos fatores físicos do ambiente onde estão, são necessárias para avaliar a ocupação do solo, produtividade das plantações, potenciais impactos ambientais, como ferramenta para a gestão do território. Este estudo teve como objetivo mapear e avaliar a expansão das plantações florestais nos últimos 30 anos nos Munícipios de Botucatu e Itatinga em relação com suas as características ambientais como clima, solos e relevo. Utilizou-se 18 imagens de Satélite Landsat TM5 desde 1984 até 2011 para análise mediante a classificação supervisada. A classificação permitiu calcular as áreas com plantações florestais em 6 períodos de 5 anos e avaliar o incremento da área plantada entre os períodos. Determinou-se as zonas de expansão e sua topografia, pedologia e climatologia. O resultado da classificação foi excelente com acurácia global entre 92 e 94 % e índice de Kappa entre 0,84 e 0,88. As plantações florestais aumentaram no período estudado 1986-2011 até 54%. A expansão das plantações aconteceu em sua maioria ao redor das áreas consolidadas até o ano de 2001, e novas grandes áreas a partir 2004-2006 e 2009-2011 no Norte centro e sul da área de estudo. As plantações ocorrem na sua maioria em Latossolos, nas zonas mais baixas e declividade menor de 12%, da mesma forma as expansões ocorrem neste mesmo tipo de características ambientais. Portanto, considera-se que em geral as plantações florestais de *Eucalyptus* e *Pinus* ocorrem e estão se expandido em zonas propicias para seu desenvolvimento.

Palavras chave: Plantações florestais, imagens Landsat, expansão, caracterização física.

ABSTRACT

Forest plantations are expanding throughout the State of São Paulo, due to the increased demand for pulp and wood. Reliable estimates of the expansion areas and characterization of the physical factors of the environment where they occur, are necessary to assess the land occupation, plantation productivity, potential environmental impacts, as a tool for the management of the territory. This study aimed to map and evaluate the expansion of forest plantations in the last 30 years in relation to the characteristics of the environment where they occur, in Botucatu and Itatinga regions, eighteen Landsat TM5 Satellite images were used from 1984 to 2011 for analysis using the supervised classification. The classification made it possible to calculate the areas with forest plantations in 6 five-year periods and to evaluate the increase of planting areas between the periods. Expansion zones and their topography, pedology and climatology were determined. The classification result was excellent with an overall accuracy between 92 and 94% and a Kappa index between 0.84 and 0.88. Forest plantations increased in the period studied 1986-2011 by 54%. The expansion of plantations took place mostly around the consolidated areas until 2001, and new large areas from 2004-2006 and 2009-2011 in the center north and south of the study area. Plantations occur mostly in Oxisols, in the lower zones and declivity less than 12%, in the same way the expansions occur in this same type of environmental characteristics. Therefore, it is considered that in general *Eucalyptus* and *Pinus* plantations occur and are expanding in areas suitable for their development.

Keywords: Forest plantations, Landsat images, expansion, physical characterization

[1] Departamento de Ciências Florestais, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo
[2] Departamento de Ciência do Solo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo
[3] Docente do Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal, Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista - UNESP, 18610-034, Botucatu, SP, Brazil

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, as plantações florestais são representadas principalmente pelos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*, ambas ocupando 8,61 milhões de hectares (ha), representando apenas 1,01% da superfície total do Brasil. Desta área, 80,9% correspondente a plantios de *Eucalyptus* e 19,1% a plantios de *Pinus*, que contribui num 1,2% ao PIB e aproximadamente 3,75 milhões de empregos diretos e indiretos. O estado de São Paulo é o segundo maior produtor de florestas plantadas no Brasil. Em 2019, teve uma área total de 1,41 milhões de ha plantados, correspondendo ao 15,7% do total da área plantada no Brasil. A maioria das plantações florestais são destinadas à produção de celulose e papel, carvão para a indústria siderúrgica, biomassa para energia, painéis de madeira industrializada, madeira sólida processada mecanicamente e pellets (IBÁ, 2020).

No estudo de grandes áreas, o sensoriamento remoto surgiu como uma ferramenta que apresenta muitas vantagens, entre elas o baixo custo por área específica, aspecto multiespectral das imagens, dados no formato digital, além da facilidade de integração das imagens com outros dados de diversas fontes dentro de um Sistema de Informações Geográficas (AZEVEDO; MANGABEIRA, 2001). No setor florestal, o uso de sensoriamento remoto trouxe muitos avanços, por exemplo, com a utilização de técnicas de interpretação de imagens é possível identificar e mapear os plantios florestais e diferenciá-los dos demais tipos de vegetação.

Dados do satélite Landsat constituem o registro mais longo de dados de observação da Terra com uma resolução espacial média na escala global, além de se destacar pelas características multiespectrais e razoável temporalidade das imagens (16 dias). Essas características viabilizam o uso de dados do Landsat, principalmente em estudos regionais, envolvendo grandes áreas (HANSEN; LOVELAND, 2012)the current methods for large area monitoring of land cover change using medium spatial resolution imagery (10-50. m. As imagens Landsat são recomendadas na maioria dos métodos de monitoramento das mudanças da cobertura da terra em resolução espacial média (10-50 m), mesmo como para avaliar a dinâmica dos reflorestamentos que exige atualizações constantes do cadastro (SÁTIRO et al., 2013).

Os últimos mapeamentos de plantações florestais por sensoriamento remoto no Estado de São Paulo são do 1999 e indicam que existem 770010 ha de reflorestamento, o que corresponde ao 3,1% da superfície de Estado de São Paulo, sendo que 79,4% são *Eucalyptus* e 20,6% *Pinus* (KRONKA, 2002). A expansão das plantações florestais principalmente *Eucalyptus* é provavelmente a mudança do agronegócio mais importante ocorrida durante os últimos anos em algumas partes do Brasil (KRÖGER, 2012). Por exemplo, o conjunto de municípios contíguos de Botucatu, Itatinga e Agudos, que durante o ano 1999-2000 abrangia 26,7% do total das áreas plantadas de São Paulo, se tornaram um dos principais polos de reflorestamento do estado (KRONKA, 2002).

Assim como em todas as atividades econômicas, a silvicultura também busca desenvolver técnicas para o manejo sustentável de florestas plantadas de eucalipto e *pinus*. Para o manejo sustentável, é preciso considerar as potencialidades e limitações do ambiente de produção de cada região. Por tanto, a avaliação dos atributos do meio físico é um fator determinante a considerar na expansão da silvicultura do eucalipto e *pinus*, visando mitigar os prováveis efeitos no meio físico como a produtividade florestal. Isto constitui uma importante ferramenta para o manejo florestal, particularmente em áreas com elevada diversidade geológica e geomorfológica (SÁTIRO et al., 2013). Condições edáficas não adequadas para o cultivo de eucalipto como solos mal drenados, rasos ou muito pedregosos não são recomendados para o cultivo comercial de eucalipto, pois seus rendimentos tendem a ser muito baixos, embora o eucalipto possa crescer nestas condições (FLORES et al., 2009).

Assim, a expansão das plantações florestais, tem que levar em conta estes fatores para uma ótima produtividade e adequada gestão territorial. Na avaliação do potencial de expansão, as plantações florestais têm grande espaço ainda com diversidade de clima solos e vegetação, sem concorrer com a produção de alimentos, espaços que na sua maioria correspondem a pastagens e áreas degradadas que contam com aptidão para a culturas florestais (REZENDE; PEREIRA; BOTELHO, 2013).

Contudo, são escassos os estudos avaliando espacialmente a expansão histórica dos plantios florestais em relação com o meio ambiente e o território. O mapeamento das florestas plantadas de eucalipto realizado a intervalos de tempo regulares, além de fornecer informação sobre a superfície plantada e a localização delas, permite conhecer as características dos lugares onde elas ocorrem como, por exemplo, o tipo de condições climáticas (precipitação, temperatura), condições pedológicas, relevo (declividade e altitude); informações que são úteis para a sustentabilidade da atividade florestal e uso da terra.

Este estudo propõe avaliar a expansão das plantações florestais e relacionar plantações com características pedológicas, topográficas e climáticas nos municípios de Botucatu e Itatinga. Os objetivos específicos são: (i) realizar o mapeamento e quantificação das florestas plantadas de eucalipto e *pinus*; (ii) avaliar a evolução histórica da expansão das plantações florestais entre o período 1984-2011; (iii) caracterizar as áreas plantadas e as novas zonas de expansão das plantações florestais no aspecto pedológico, topográfico e climático; e (iv) avaliar a acurácia da classificação com imagens do satélite Landsat.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

Este estudo teve como foco os municípios de Botucatu e Itatinga no centro oeste de São Paulo, Brasil (Figura 1). Estes municípios são considerados um dos principais polos de reflorestamento do estado de São Paulo (KRONKA, 2002).

O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é caracterizado como Cfa e Cfb (ALVARES et al., 2013b). A precipitação média anual é de 1400 mm, com 48% concentrada no verão, 23% na primavera, 21% no outono e 8% no inverno. A temperatura média anual é de 20,4 ºC, com mínimo de 8,9 ºC em julho e máxima de 28,8 ºC em janeiro (ALVARES et al., 2013a).

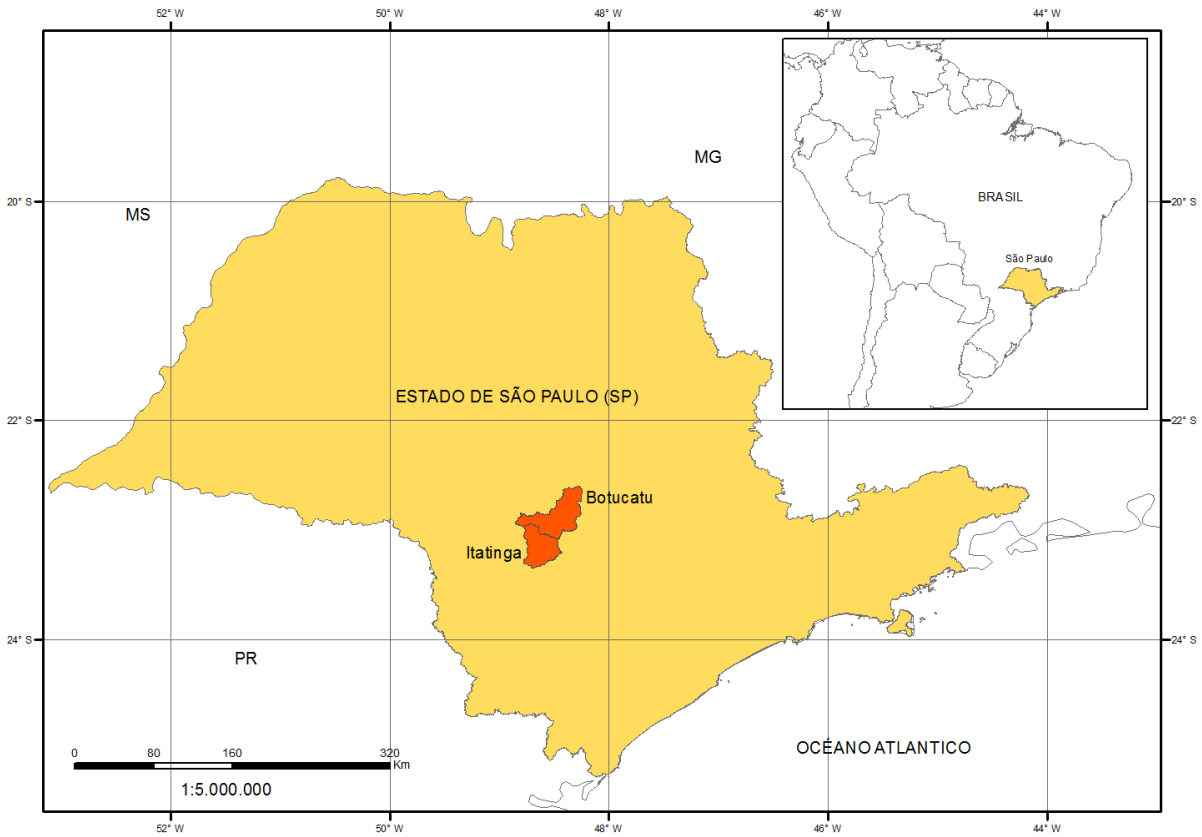

Figura 1. Localização da área de estudo conformada pelos municípios de Botucatu e Itatinga no estado de São Paulo, Brasil.

Imagens de Satélite

Foram usadas 18 imagens do satélite Landsat 5 TM, cena 220/76, dos anos 1984-1986, 1989-1991, 1994-1996, 1999-2001, 2004-2006 e 2009-2011, com 7 bandas espectrais e resolução espacial de 30 m (Tabela 1):

Tabela 1. Detalhes técnicos das imagens de Satélite Landsat 5 TM usadas no estudo.

Satélite	Sensor	Data de aquisição	N° de bandas	% Nuvens
Landsat 5	TM	20-06-1984	7	0
Landsat 5	TM	11-09-1985	7	0
Landsat 5	TM	14-09-1986	7	0
Landsat 5	TM	22-09-1989	7	0
Landsat 5	TM	02-04-1990	7	0
Landsat 5	TM	12-09-1991	7	0
Landsat 5	TM	20-09-1994	7	0
Landsat 5	TM	07-09-1995	7	0
Landsat 5	TM	24-08-1996	7	0
Landsat 5	TM	02-09-1999	7	0
Landsat 5	TM	16-06-2000	7	0
Landsat 5	TM	06-08-2001	7	0
Landsat 5	TM	14-08-2004	7	0
Landsat 5	TM	17-08-2005	7	0
Landsat 5	TM	23-10-2006	7	0
Landsat 5	TM	28-08-2009	7	0
Landsat 5	TM	31-08-2010	7	0
Landsat 5	TM	03-09-2011	7	0

As imagens foram obtidas da página web da USGS (Serviço Geológico dos Estados Unidos) com ortocorreção e georreferenciamento no sistema UTM WGS84 22N. Portanto, uma transformação para o sistema UTM WGS84 22S foi realizada em todas as imagens e bandas. Após, as imagens foram compostas nas suas 7 bandas e cortadas com o perímetro da área de estudo.

Foram priorizadas imagens com a mínima cobertura de nuvens possível, de preferência aquelas coletadas no fim do inverno e início da primavera (agosto a outubro) período no qual as florestas plantadas são mais simples de serem identificadas dos demais usos do solo. Neste período, as áreas com cana de açúcar já foram colhidas, diminuindo drasticamente a probabilidade de confusões de florestas plantadas com este tipo de cultura. Além disso, as pastagens estão no final do ciclo fenológico (senescência) nesta época do ano, facilitando também a separação das demais coberturas vegetais do entorno da cultura alvo de estudo.

Classificação de uso do solo

A classificação consistiu na extração de informação das imagens compostas para reconhecer padrões dos plantios florestais, diferenciá-los dos demais tipos de vegetação e, portanto, mapeá-los. As imagens foram trabalhadas com a combinação falsa cor: Red-Banda 5, Green-Banda 4 e Blue-Banda 3. Esta combinação permite um bom contraste entre as áreas com vegetação e o solo exposto, além de marcar bem os corpos de água e ter grande sensibilidade à umidade da vegetação. Além disto, foram extraídos em formato raster o NDVI (índice de vegetação de diferença normalizada) de cada imagem com a finalidade de auxiliar na identificação dos padrões das florestas plantadas. A vegetação com maior vigor tem altos valores de NDVI, correspondendo geralmente às florestas. Particularmente o *Eucalyptus* e *Pinus* caracteriza-se pelo elevado aumento de NDVI durante os dois primeiros anos após o plantio e a oscilação sazonal do NDVI em torno de valores altos até a colheita, que ocorre entre 5 e 7 anos (LE MAIRE et al., 2014), podendo dessa forma diferenciá-los de outras culturas. Além disto, o histórico de imagens do Google Earth foi usado para identificar padrões visuais das florestas plantadas e relacioná-las com a combinação do falso cor da imagem Landsat e o NDVI.

Para o processo de classificação foi utilizado o software ArcGIS 10.1, com o qual foram criados uma camada de polígonos para cada imagem, contendo 4 classes: 1-floresta plantada (*Eucalyptus* e *Pinus*), 2-floresta nativa, 3-solo exposto e/ou cana de açúcar, e 4-corpos d'água. Para cada classe foram amostrados entre 40-50 polígonos para a classificação supervisada com a ajuda da fotointerpretação de imagens de alta resolução do Google Earth e imagens

Landsat de datas similares. Em algumas zonas da área de estudo tinham se concordância das datas, nestas foram amostrados muitos elementos das classes avaliadas, o qual contribuiu na exatidão da classificação final. Por outro lado, as zonas da área de estudo onde não se tinham imagens disponíveis concordantes com as datas para o treinamento das classes, analisou segundo a experiência adquirida com o uso das imagens disponíveis de alta resolução e comparando com outras imagens Landsat do ano anterior e o ano posterior para detectar mudanças na cobertura relacionadas a presença de plantações florestais. Assim, conseguiu-se amostras bem espalhadas em toda a área para uma classificação mais precisa. Portanto, obteve-se robustos mapas finais para os períodos 2004-2006 e 2009-2011. No casso dos outros períodos (1984-1986, 1989-1991, 1994-1996 e 1999-2001), se fez o treinamento da classificação supervisada usando a experiência adquirida com a fotointerpretação dos períodos 2004-2006 e 2009-2011. Após criação de polígonos da amostragem, foram criadas as assinaturas das classes, para depois fazer a classificação das imagens com o algoritmo de "Maximum likelihood classification" (Classificação de máxima verossimilhança).

Depois de classificadas as imagens e obtida a classe florestas plantadas foi necessária uma edição matricial automática com a ferramenta "Majority Filter" para corrigir os pixels erroneamente classificados, e edições manuais de alguns erros identificados na classificação supervisada.

Validação da classificação

A validação foi feita utilizando um delineamento aleatorizado de amostras (pontos) iguais para dois tipos de classes "plantações florestais", composta por plantios de *Eucalyptus* e *Pinus*, e "floresta nativa", a escolha destes dois tipos de classe foi porque existe uma maior probabilidade da confusão destes dois tipos de vegetação pela maior similaridade das respostas espectrais. Avaliaram-se os erros por inclusão e os erros de omissão.

Para o período 2009-2011 foram validadas as classificações do ano 2010 e 2011 sendo amostrados aleatoriamente 25 pontos por classe e por ano. Para o período 2004-2006 foi validada a classificação do ano 2006 amostrando 25 pontos por classe. Não foram validadas classificações de outros anos devido à falta de imagens de referência de alta resolução do Google Earth da área de estudo durante esses anos. Os pontos amostrados foram exportados para o Google Earth, e visualmente e individualmente examinados e classificados em dois classes: 1- Floresta plantada 2-Floresta nativa.

No casso dos outros períodos (1984-1986, 1989-1991, 1994-1996 e 1999-2001), não foi possível realizar a avaliação da sua acurácia devido à falta de fontes nessas datas, porém assumiu-se próxima aos resultados conseguidos com as imagens 2011 e 2006, pois foi aplicada a mesma metodologia na classificação.

Neste trabalho se comprovou a complexidade da classificação de plantações florestais de curta rotação e a quantificação da taxa de reflorestamento. A diferença entre um aumento ou redução de reflorestamento depende do calendário de replantio entre duas rotações ou os ciclos de produção durante o período avaliado. O fato de ser de ciclos curtos, entre 5 ou 7 anos para *Eucalyptus*, para determinar a existência deles não basta com uma simples presença numa determinada data, já que se pode inferir sobre a idade da rotação atual. Assim, para evitar este tipo de erro na estimação real das áreas com plantações florestais de *Eucalyptus* e *Pinus*, decidiu-se avaliar a presença de áreas com plantios florestais numa amplitude temporal de 2 anos. Por exemplo, analisando 3 imagens (início-médio-final) para avaliar as áreas com plantações no 2009-2011 usaram-se imagens de 2009, 2010 e 2011. Desta forma, foi possível determinar com confiabilidade as áreas com plantios existentes num determinado período.

Caracterização ambiental e dinâmica das plantações florestais

Foram realizadas intersecções dos mapas de solos, variáveis climáticas e relevo com as camadas das áreas mapeadas de plantações e as camadas extraídas das diferenças entre os períodos avaliados, e desta forma se conseguiu caracterizar e descrever o sítio das plantações florestais e as características das novas áreas em expansão.

Dados de Solos

Usou-se o mapa de solos do Estado de São Paulo de escala 1: 500000 (OLIVEIRA et al., 1999). O mapa original segundo Sistema de Classificação Brasileira de Solos, em 10 classes e 434 subclasses, também contêm uma breve descrição referente ao relevo e às propriedades físicas e químicas de cada classe de solo. Para o trabalho da área de estudo, este mesmo mapa, contém 4 ordens de solos e 18 subordens de solos.

Dados de Relevo

Para caracterizar a topografia nas áreas de plantações florestais usou-se o DEM (Modelo de elevação digital) da "Shuttle Radar Topography Mission" (SRTM), obtido da página web da USGS (Serviço Geológico dos Estados Unidos). O produto DEM "SRTM 1 Arc-Second" fornece dados de altitude com uma resolução espacial de 1 segundo de arco (aprox. 30 m). Para a zona de estudo foi necessárias duas cenas (-23s -49w e -24s -49w), depois foram unidas cortadas e projetadas para a área de estudo; a partir deste DEM foi gerada a declividade em porcentagem.

Dados climáticos

Para a caracterização climática das plantações florestais foram utilizados mapas climáticos de 1 km^2 de resolução gerados por modelos desenvolvidos especificamente para o Brasil (ALVARES et al., 2013a, 2013b). Os polígonos resultantes da classificação, correspondentes as plantações de eucalipto, foram superpostos nestes mapas climáticos, extraindo assim os valores de precipitação e temperatura média anual das plantações florestais identificadas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resultado do cruzamento dos pontos de controle das imagens de alta resolução do Google Earth com as imagens classificadas nos períodos 2004-2006 e 2009-2011 estão apresentados na Tabela 2. A matriz de erros foi construída baseado na comparação da classificação Landsat com a interpretação das imagens do Google Earth. A acurácia média, acurácia global e coeficiente de Kappa tanto para o período 2004-2006 quanto 2009-2011 foram muito altos, indicando que a classificação foi excelente na área que abrange os municípios de Botucatu e Itatinga. A acurácia do produtor foi alta para as duas classes Floresta plantada e Floresta nativa (anos 2004-2006: 96% e 88% e anos 2009-2011: 92,3 e 95,8%), portanto a maioria das plantações observadas e os outros tipos de cobertura, foram corretamente classificadas. A acurácia do usuário, que representa a porcentagem de Plantações no mapa final que foi corretamente classificado, foi de 96% para ambos períodos, o qual é alta e indica que os mapas são confiáveis.

Tabela 2. Matriz de erros para análise da acurácia obtida na classificação digital das imagens Landsat.

Período 2004-2006		**Classes atuais (fotointerpretação de imagens do Google Earth)**			**Acurácia do produtor***
		Floresta plantada	**Floresta nativa**	**Total**	**%**
Classes preditas (classificação supervisada com imagens Landsat TM5)	Floresta plantada	24	1	25	96,0
	Floresta nativa	3	22	25	88,0
	Total	28	23	50	
Acurácia do usuário	%	85,7	95,7		
Acurácia média	%	90,7	Índice de Kappa:	0,84	
Acurácia global	%	92,0			
Período 2009-2011		**Floresta plantada**	**Floresta nativa**	**Total**	
Classes preditas (classificação supervisada com imagens Landsat TM5)	Floresta plantada	48	2	50	96,0
	Floresta nativa	4	46	50	92,0
	Total	52	48	100	
Acurácia do usuário	%	92,3	95,8		
Acurácia media	%	94,1	Índice de Kappa:	0,88	
Acurácia global	%	94,0			

*A acurácia do produtor está associada ao erro de omissão, que ocorre quando deixamos de mapear um pixel da classe.

A acurácia do produtor da classe Floresta nativa (92%) mostra-se ligeiramente menor quando comparando com a Floresta plantada (96%). Estes pequenos erros na classificação são devidos ao estado de desenvolvimento da Floresta plantada, sendo que os plantios de eucalipto apresentam altos valores de resposta espectral nas bandas 3, 4 e 5, e o NDVI atinge valores mais altos nos primeiros 2 e 3 anos permitindo uma boa diferenciação de outros tipos de vegetação (LE MAIRE et al., 2014). As plantações velhas podem ser confundidas com vegetação nativa (DE CARVALHO et al., 2004) ou outro tipo de plantações florestais (LE MAIRE et al., 2011). Além disso, algumas áreas onde as plantações estão mais espaçadas são prováveis a confusão com as florestas nativas. Por outro lado, identificou-se pequenos erros na classificação da classe Floresta plantada em áreas de vegetação nativa pois misturava-se com as árvores de *Eucalyptus* ou *Pinus*, correspondendo geralmente a áreas próximas de cursos d'água. Resultados satisfatórios foram obtidos na classificação de povoamentos florestais, com uma acurácia global de 85% a 90% e Kappa de 0,85 (BOLFE et al., 2004; LE MAIRE et al., 2014). Neste trabalho tanto os índices e acurácia global (94%), e o índice de Kappa (0,88), demostraram excelente qualidade da classificação, superior a acurácia reportada em outros estudos como os citados anteriormente.

Dinâmica das áreas de plantações florestais

O levantamento indica que no primeiro período 1984-1986 existiam 38767 ha de plantações florestais de *Eucalyptus* e *Pinus*, havendo depois incrementos e poucos encolhimentos, assim no último período avaliado de 2009-2011 já existiam um total de 59771 ha de plantações (Tabela 3), este valor corresponde ao 24% do total da área territorial dos municípios de Botucatu e Itatinga.

Tabela 3. Dinâmica das áreas de plantações florestais total nos períodos avaliados.

Período	Plantações florestais (ha)	Incremento corrente (ha)	Incremento corrente %	Incremento total 1984 a 2011 %
1984-1986	38767	3.321	8,6	54,2
1989-1991	42088			
1989-1991	42088	-6.016	-14,3	
1994-1996	36072			
1994-1996	36072	6.082	17,3	
1999-2001	42329			
1999-2001	42329	6.111	14,0	
2004-2006	48266			
2004-2006	48266	11.504	23,8	
2009-2011	59771			

Com exceção do período compreendido entre 1989-1991 e 1994-1996, houve incremento constante das áreas plantações florestais, ou seja, novas áreas ocupadas com plantios de *Eucalyptus* e *Pinus* nos Municípios de Botucatu e Itatinga. Assim, se verificou que os maiores incrementos aconteceram nos três últimos períodos avaliados, sendo nos últimos períodos 2004-2006 e 2009-2011 aconteceu a maior expansão das plantações florestais (23,8 %) em apenas 5 anos (Figura 2). Possivelmente, esta expansão dos últimos anos seja uma das maiores em todo o estado de São Paulo, porque segundo as estatísticas neste mesmo período o incremento de áreas com plantações florestais de *Eucalyptus* e *Pinus*, para todo o Estado, foram em torno de 5,1 % (IBÁ, 2020). Outros autores observaram também expansões das plantações durante estes anos em outras regiões do estado de São Paulo (VIANA et al., 2010).

Durante o período compreendido entre 1989-1991 e 1994-1996 foram observados diminuição das áreas com plantações florestais de aproximadamente 14,3 %. Esta redução é concordante com os resultados encontrados por KRONKA (2002) que estimou uma redução das áreas de reflorestamento na região administrativa de Sorocaba (9,5%) no período entre 1991 e 2000 o que devido à expressiva redução dos plantios de *Pinus* (22,6%).

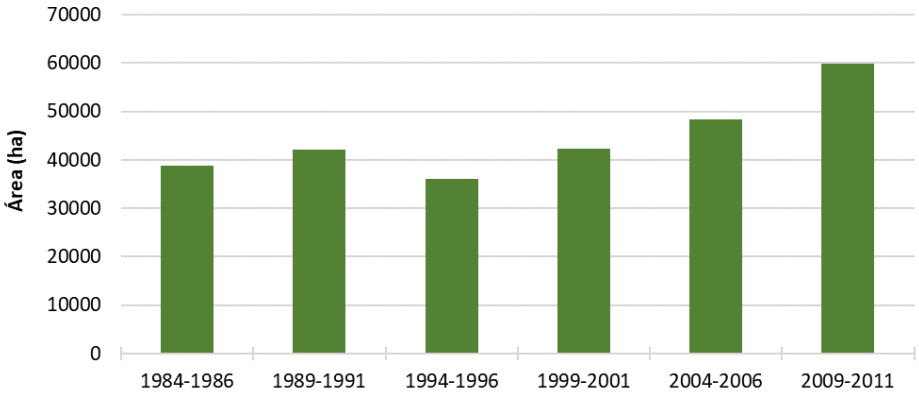

Figura 2. Evolução das áreas de plantações florestais a cada cinco anos desde 1984 até 2011

No estudo, durante o período 1999-2001 existiam 42329 ha de florestas plantadas de *Eucalyptus* e *Pinus*. Neste mesmo período no inventário de reflorestamento de São Paulo encontrou-se, para a nossa área de estudo, que as florestas plantadas ocupavam 50815 ha (KRONKA, 2002). A área é 20% maior que o encontrado no presente estudo, devido a algumas áreas de florestas nativas terem sido mapeadas como florestas plantadas, e pela menor escala de trabalho que diminui os detalhes dos talhões (KRONKA, 2002).

Com tudo, ao longo de 27 anos (1984 até 2011) houve uma expansão das plantações florestais estimada em 54,2%. Assim, pode-se afirmar que estes municípios são eminentemente florestais, onde predomina a atividade florestal com respeito ao uso do solo. Outros estudos anteriores tinham considerado a área de Botucatu, Itatinga e Agudos um dos principais polos de reflorestamento do Estado de São Paulo onde a silvicultura do *Eucalyptus* e *Pinus* é mais crescente em comparação com outras zonas do estado de São Paulo (KRONKA, 2002).

Análise da dinâmica da expansão

A Figura 3 mostra as novas áreas convertidas ao uso de plantações florestais mesmo como áreas de plantações que passaram a outros usos. Pode-se observar um incremento continuado ao longo dos anos, apresentando uma diferença significativa das plantações florestais de 1984 a 2011. No período estudado a maioria das áreas novas aparecem ao redor das áreas consolidadas até o período 1999-2001, depois nos períodos 2004-2006 e 2009-2011, principalmente ao final deste último período, observa-se novas grandes áreas de expansão, gerando aproximação entre as três zonas (sul, centro e norte). A área situada no norte da área de estudo se manteve estável até o ano 2004 quando se iniciou uma expansão. A zona central e do sul, estiveram em constante crescimento sendo as áreas com maior incremento das plantações florestais.

Caracterização ambiental e dinâmica das plantações florestais

As plantações florestais consolidadas do início ao fim do período estudado situam-se em sua maioria sobre Latossolos, e em menor medida sobre Neossolos, Argissolos e Nitossolos (Figura 4).

Os Latossolos são Vermelhos e Vermelho-Amarelos, distróficos e de textura média. Estes tipos de solos se caracterizam por serem muito profundos e intemperizados o qual provoca a lixiviação dos nutrientes, classificados assim como distróficos, ou seja, baixa saturação por bases. Além disso, os solos da área de estudo têm textura entre arenosa e média indicando, por um lado, a pouca proporção de argila e por outro a elevada drenabilidade. A profundidade dos solos e boa drenagem favorecem o desenvolvimento da cultura do eucalipto (FLORES et al., 2009; JORGE SIMÕES et al., 2012), por tanto, considera-se que este tipo de solo cumpre com estes dois aspetos, porém, têm limitações de fertilidade. Em 2009-2011, 12% das áreas encontravam-se sobre Neossolos Quartzarênicos (Tabela 4 e Figura 4). Estes são solos de textura arenosa, distróficos, ou seja, pouco férteis, e muito drenados. Geralmente, a excessiva drenagem pode apresentar problemas de armazenamento de água, portanto, falta de água para as culturas. Os Argissolos Vermelho-Amarelos correspondem a 5 % da área das plantações florestais. Esta ordem de solos tem textura média/arenosa que apresentam um forte contraste textural, o qual pode causar problemas de acúmulo de água ou problemas de erosão. No Brasil, as plantações florestais no Bioma Cerrado estão

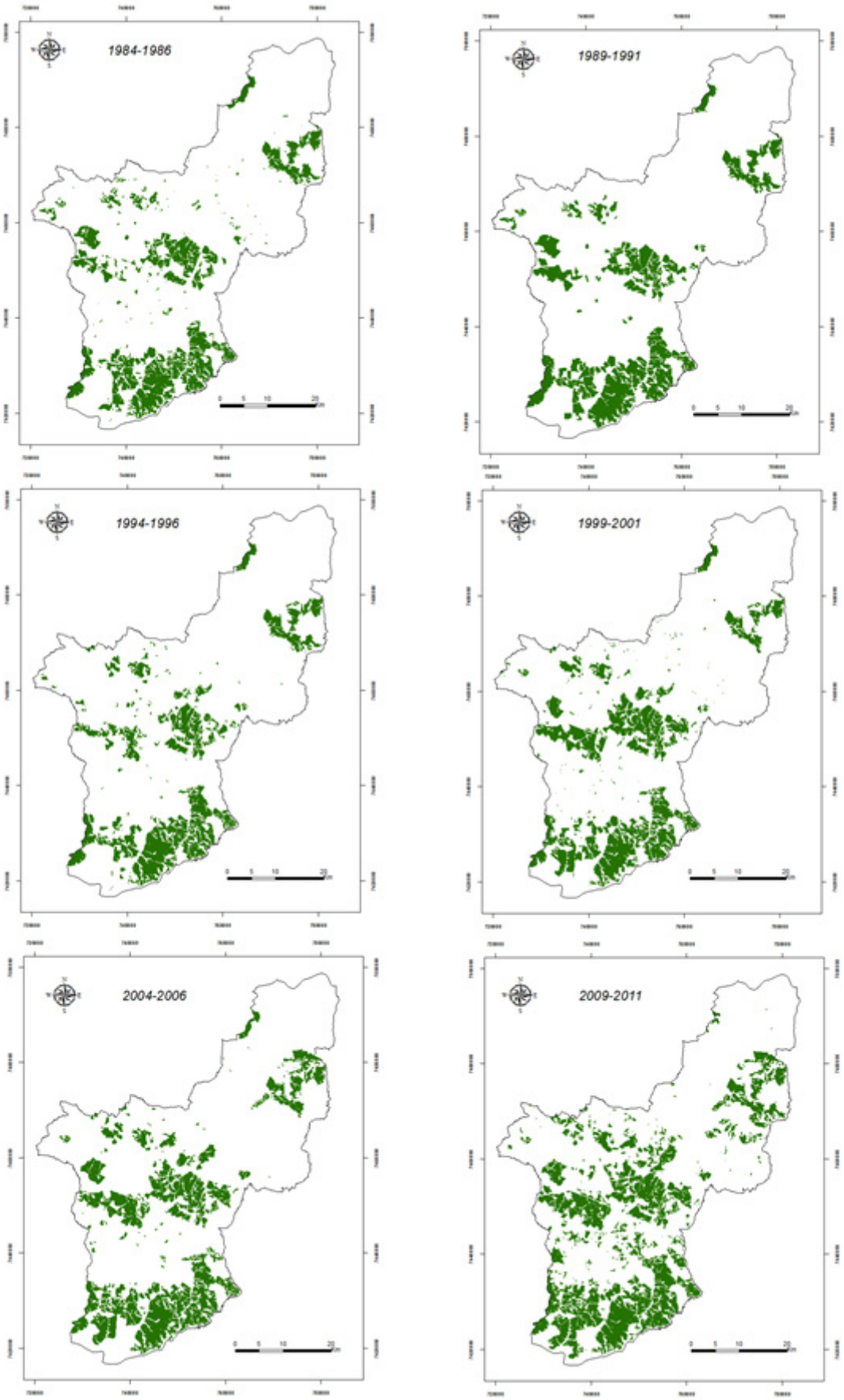

Figura 3. Plantações florestais de *Eucalyptus* e *Pinus* nos municípios de Botucatu e Itatinga.

localizadas em Latossolos Vermelho-Amarelos, Latossolos Vermelhos, Argissolos Vermelho-Amarelos e Neossolos Quartzarênicos (OLIVEIRA et al., 1999). Em decorrência da condição natural de baixa fertilidade desses solos, a utilização de fertilizantes e de outros insumos são práticas obrigatórias (DA SILVA MARTINS et al., 2004; ROCHA; GONÇALVES; MOURA, 2004). A pobreza desses solos juntamente com a utilização inadequada de fertilizantes, e o conhecimento deficiente das necessidades nutricionais das espécies florestais contribuem para que ocorram deficiências nutricionais nos reflorestamentos brasileiros (GONCALVES et al., 2008).

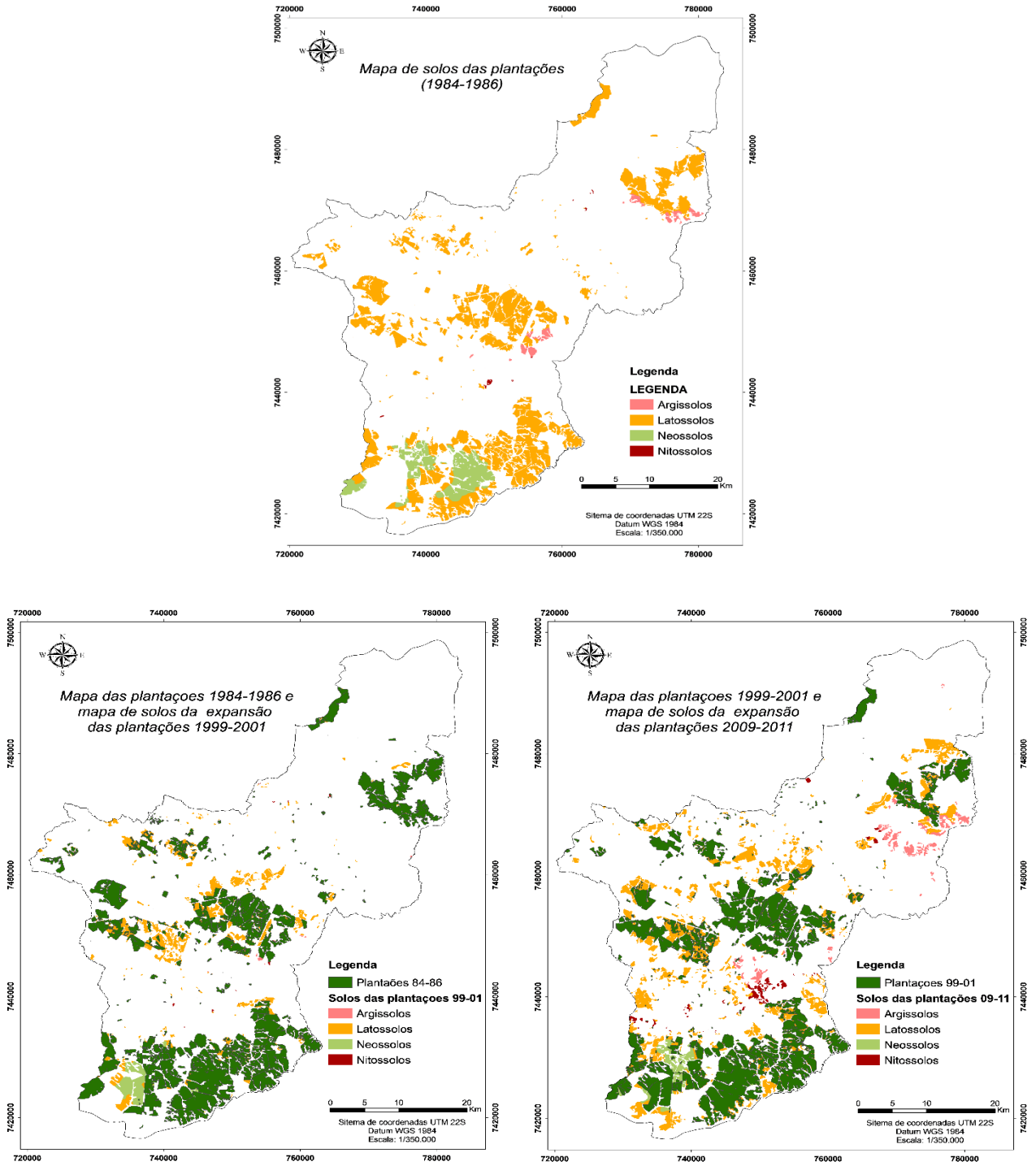

Figura 4. Caracterização das ordens de solos das plantações florestais nos municípios de Botucatu e Itatinga nos períodos avaliados.

Tabela 4. Plantações florestais segundo o tipo de solo em os diferentes períodos analisados.

	1984-1986		2009-2011		Expansão 1984 a 2001	Expansão 2001 a 2011
	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)	Área (%)	Área (%)
Argissolos	1179	3,0	2807	4,7	1,0	9,0
Latossolos	31779	82,0	48335	80,9	80,9	79,2
Neossolos	5678	14,7	7610	12,7	17,6	7,6
Nitossolos	109	0,3	974	1,6	0,6	4,1
Total	38747	100	59727	100	100	100

Nos períodos analisados, tanto em 1984 a 2001 quanto em 2002 a 2011, as plantações expandiram-se sobre os Latossolos (79,2% e 80,9% respetivamente). Observa-se que no período de 1984 a 2001 as expansões ocorreram em Latossolos e Neossolos, entretanto, no período de maior incremento, as novas áreas foram mais diversas, sendo na sua maioria Latossolos, mas aumentando sobre Argissolos (9%), Neossolos (8%) e Nitossolos (4%). O mapa de solos descreve os Nitossolos da área como Nitossolos Vermelhos Eutroficos com horizonte superficial chernozêmico; os quais são solos excelentes desde o ponto de vista agronômico tanto pelas características físicas como as químicas (OLIVEIRA et al., 1999).

Nos estados de São Paulo, Minas Gerais, Bahia e Espírito Santo, os povoamentos florestais, geralmente, são implantados em solos de baixa fertilidade, que já perderam sua fertilidade primitiva pela exploração agrícola, ou em terras pouco trabalhadas, mas que, por sua baixa fertilidade e condições físicas desfavoráveis, ou pela má topografia, e não são solos apropriados para outras culturas (SILVEIRA; HIGASHI, 2001). Os solos de alta fertilidade foram historicamente destinados às culturas agrícolas (CAMARGO et al., 2004). No entanto, estudos sobre aptidão das áreas para as plantações florestais consideram os Latossolos melhores do que os Argissolos e Neossolos (SÁTIRO et al., 2013), portanto, pode-se concluir que a maioria das expansões florestais da área estão implantando-se no lugar mais adequado, sem levar em conta as áreas (apenas 4%) de expansão sobre os Nitossolos.

A maior parte das plantações florestais localizam-se entre as cotas baixas e intermediárias (550-850 m) da área de estudo, tanto no início do período quanto no seu final (Tabela 5 e Figura 5). Observa-se que com o tempo, a tendência da ocupação de novas áreas é similar, sendo que maioria das novas plantações florestais se encontram entre 550-650 e 750-850 m para o período intermediário e final. As plantações apenas se expandiram para áreas de cotas menores, 450-550 m, as quais têm as porcentagens mais baixas de expansão e representam 4% das plantações em ambos períodos.

Tabela 5. Plantações florestais segundo a altitude em diferentes períodos, e altitudes para onde estão expandindo as áreas novas.

Altitude (m)	1984-1986		2009-2011		Expansão 1984 a 2001	Expansão 2001 a 2011
	Área (ha)	%	Área (ha)	%	%	%
440-550	1583	4,1	2563	4,3	0,6	6,6
550-650	18123	46,7	22682	38,0	22,4	37,4
650-750	6573	17,0	9209	15,4	13,8	12,1
750-850	7676	19,8	16846	28,2	49,5	30,4
850-950	4811	12,4	8439	14,1	13,8	13,5
Total	38767	100,0	59741	100,0	100,0	100,0

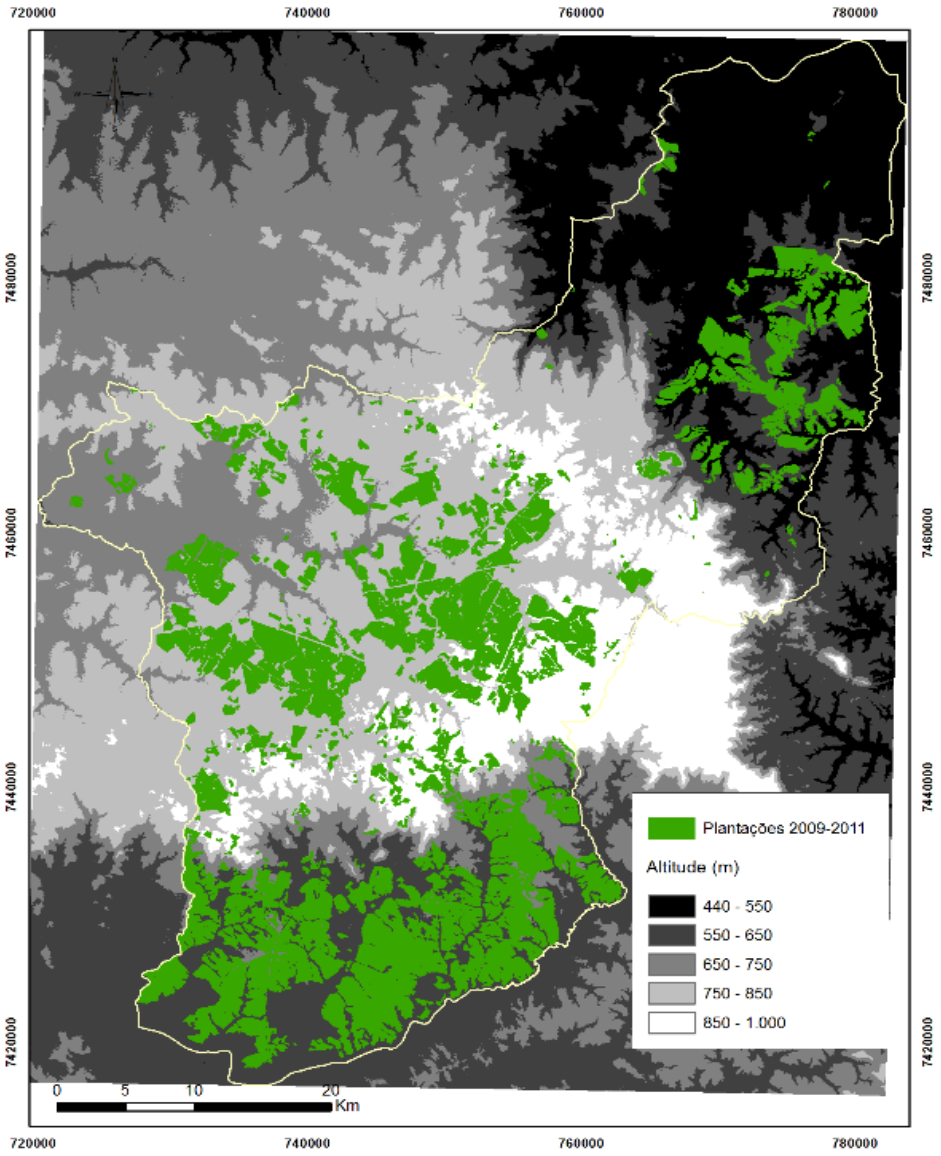

Figura 5. Classes de altitude e as plantações florestais no período 2009-2011.

Os resultados da declividade apresentam que a maioria das plantações se localizam em áreas com pouca declividade (Tabela 6, e Figura 6). O conjunto das áreas em 0-5% de declividade e 5-12% representam aproximadamente 73 % de todas as plantações em ambos os períodos. Observa-se que ao longo dos anos existiu uma tendência positiva no incremento das plantações em declividade de 5-12 % nos dois intervalos de tempo avaliados. Considera-se esta tendência favorável, já que, a declividade tem um efeito indireto no crescimento da árvore e é mais pronunciado em rampas mais inclinadas (ORTIZ, 2003). O crescimento varia em função do relevo, e de modo geral, o aumento da declividade reduz o crescimento (BRAGA et al., 1999). Outro motivo para plantar em áreas mais planas é facilidade da mecanização nas atividades silviculturais.

Por outro lado, nos anos 2001 a 2011 começou aparecer uma pequena tendência de plantações em áreas de declividade 12-20%. Árvores localizadas nas rampas mais íngremes geralmente apresentam fortes sintomas de deficiência nutricional (ORTIZ, 2003), portanto, as áreas com menor declividade são as mais produtivas para o plantio de eucalipto. Na figura 6 pode-se observar mais claramente como atualmente as plantações ocorrem na sua grande maioria em zonas menos declivosas.

Nas plantações florestais de *Eucalyptus* e *Pinus* observou-se que não existe grande variabilidade devido ao tamanho reduzido da área de estudo (Figura 7). A temperatura média anual flutuou entre 18 e 21°C, e precipitação anual entre 1267 e 1368 mm. As variações climáticas de temperatura média e precipitação anual

associam-se ao relevo. Portanto, áreas de maior altitude situadas nas terras altas contêm valores mais elevados de precipitação anual e menores de temperatura (1368mm e 18°C). Por outro lado, as áreas menos elevadas da paisagem são mais secas e mais quentes (1267mm e 21ºC).

Tabela 6. Plantações florestais segundo a declividade em diferentes períodos, e declividades para onde estão expandindo as áreas novas.

Declividade (%)	1984-1986		2009-2011		Expansão 1984 a 2001	Expansão 2001 a 2011
	Área (ha)	%	Área (ha)	%	%	%
0-5	10627	27,4	15162	25,4	25,6	21,0
5-12	18538	47,8	28440	47,6	46,2	46,4
12-20	7127	18,4	12021	20,1	19,4	24,0
20-45	2444	6,3	4011	6,7	8,7	8,2
>45	30	0,1	105	0,2	0,1	0,4
Total	38767	100	59741	100,0	100,0	100,0

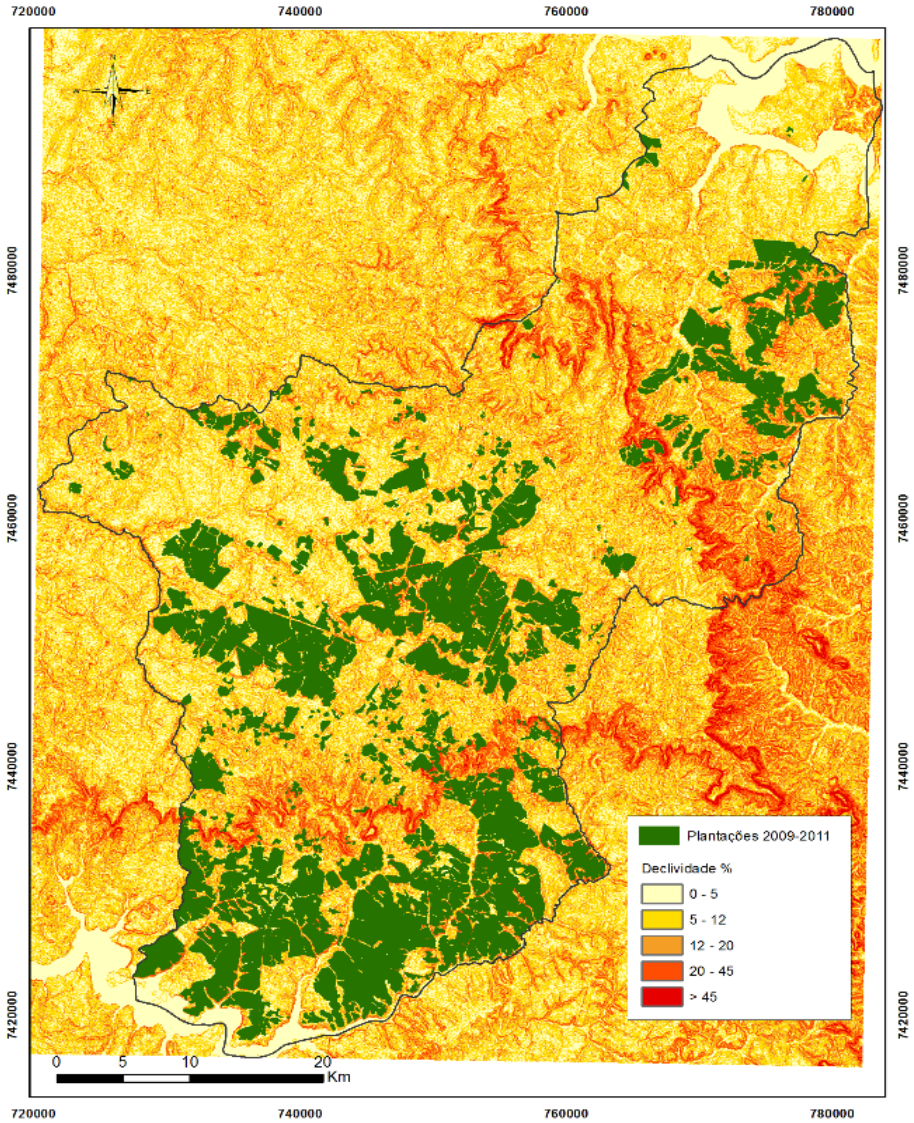

Figura 6. Classes de declividade e as plantações florestais no período 2009-2011.

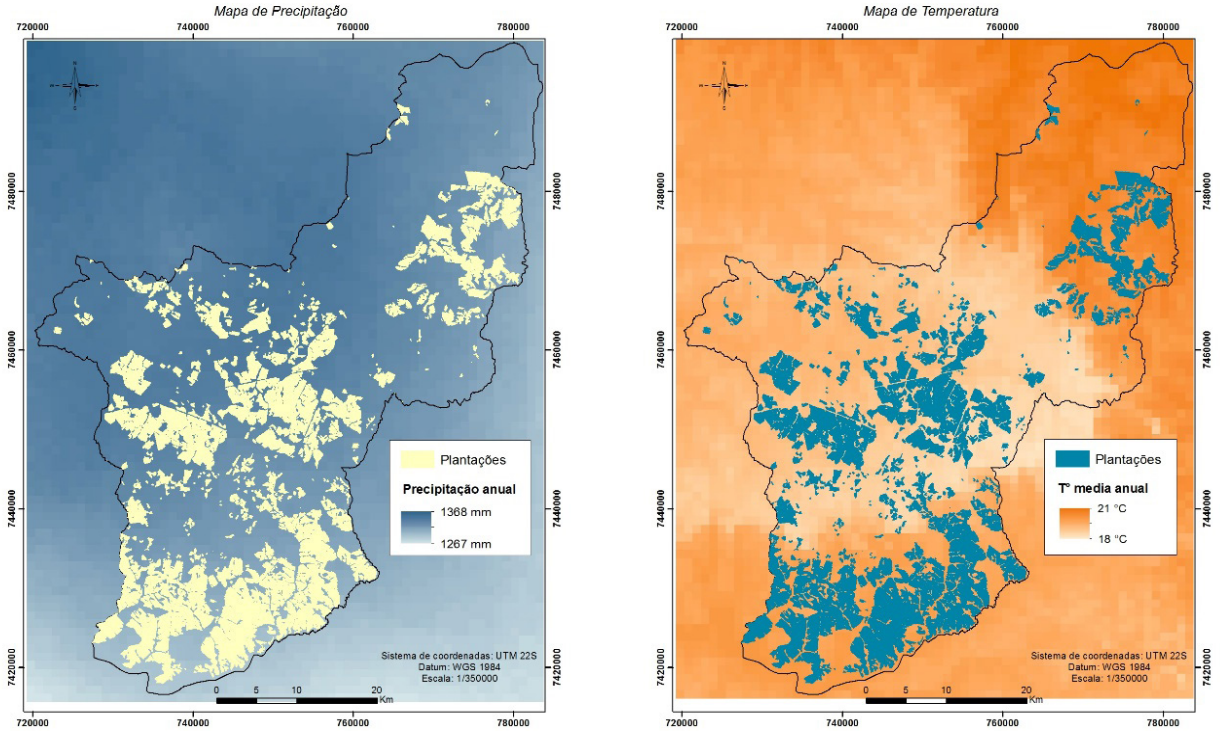

Figura 7. Precipitação e temperatura anual da área de estudo e as plantações florestais entre 2009-2011.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de imagens do satélite Landsat é adequado para realizar a classificação supervisionada e diferenciar entre floresta nativa e plantações florestais de *Eucalyptus* e *Pinus*, podendo obter alto grau de acurácia.

As plantações florestais aumentaram até 54% nos municípios de Botucatu e Itatinga no período estudado de 1986 a 2011. A maior expansão aconteceu entre 2006 e 2011 com uma expansão de 24%, indicando rápido desenvolvimento da silvicultura nestes municípios.

As plantações atuais situam-se em sua grande maioria sobre Latossolos, de baixa altitude e baixa declividade. As novas expansões estão ocupando zonas com características similares do terreno, mas com leve tendência de ocupar outras ordens de solos como Argissolos, Neossolos e Nitossolos. Botucatu e Itatinga concentram extensas áreas com plantações florestais totalizando 59741 ha até 2011, sendo uns dos principais polos de silvicultura do Estado de São Paulo.

Estudos atualizados sobre as novas expansões das plantações florestais e estimações associadas aos fatores ambientais são necessárias para controlar e avaliar a ocupação do solo, a produtividade das plantações, os potenciais impactos ambientais e adequada gestão do território.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

ALVARES, C. A. et al. Modeling monthly mean air temperature for Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 113, n. 3–4, p. 407–427, 2013a.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 1 dez. 2013b.

AZEVEDO, E. C.; MANGABEIRA, J. A. C. **Mapeamento de uso das terras utilizando processamento digital de imagem de Sensoriamento Remoto**. [s.l: s.n.].

BOLFE, É. L. et al. Avaliação da classificação digital de povoamentos florestais em imagens de satélite através de índices de acurácia. **Revista Árvore**, v. 28, n. 1, p. 85–90, fev. 2004. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-67622004000100011&lng=en&nrm=iso&tlng=pt>. Acesso em: 31 mar. 2021.

BRAGA, F. A. et al. Características ambientais determinantes da capacidade produtiva de sítios cultivados com eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 2, p. 291–298, jun. 1999. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06831999000200013&lng=en&nrm=iso&tlng=pt>. Acesso em: 1 abr. 2021.

CAMARGO, M. L. P. de et al. Considerações sobre eficiência nutricional em *Eucalyptus*. **Científica**, v. 32, n. 2, p. 191–196, 7 maio 2004. Disponível em: <http://cientifica.org.br/index.php/cientifica/article/view/87>. Acesso em: 31 mar. 2021.

DA SILVA MARTINS, L. F. et al. Características do sistema radicular das árvores de *Eucalyptus* grandis em resposta à aplicação de doses crescentes de biossólido. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, n. 65, p. 207–218, 2004.

DE CARVALHO, L. M. T. et al. Selection of imagery data and classifiers for mapping Brazilian semideciduous Atlantic forests. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 5, n. 3, p. 173–186, 1 set. 2004.

FLORES, C. A. et al. **Zoneamento edafico para o *Eucalyptus* na regiao do Corede Sul, Estado do Rio Grande do Sul** Embrapa Florestas, , 2009. .

GONCALVES, J. L. M. et al. Assessing the effects of early silvicultural management on long-term site productivity of fast-growing eucalypt plantations: the Brazilian experience. **Southern Forests**, v. 70, n. 2, p. 105–118, 2008.

HANSEN, M. C.; LOVELAND, T. R. **A review of large area monitoring of land cover change using Landsat dataRemote Sensing of Environment**Elsevier, , 1 jul. 2012. .

IBÁ. **Relatório IBÁ 2017**. [s.l: s.n.].

JORGE SIMÕES, S. C. et al. Relação do meio físico com o manejo sustentável de plantio de eucalipto em áreas de terrenos acidentados na fazenda Santa Edwirges, Vale do Paraíba, sudeste do Brasil. **Geociências**, v. 31, n. 3, p. 431–445, 2012.

KRÖGER, M. The Expansion of Industrial Tree Plantations and Dispossession in Brazil. **Development and Change**, v. 43, n. 4, p. 947–973, 1 jul. 2012. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1467-7660.2012.01787.x>. Acesso em: 31 mar. 2021.

KRONKA, F. J. . **Inventário florestal das áreas reflorestadas do Estado de São Paulo**. São Paulo: Instituto Florestal, 2002.

LE MAIRE, G. et al. Leaf area index estimation with MODIS reflectance time series and model inversion during full rotations of *Eucalyptus* plantations. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 2, p. 586–599, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2010.10.004>.

LE MAIRE, G. et al. Mapping short-rotation plantations at regional scale using MODIS time series: Case of eucalypt plantations in Brazil. **Remote Sensing of Environment**, v. 152, p. 136–149, 1 set. 2014.

OLIVEIRA, J. B. et al. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo: legenda expandida**. Campinas: Embrapa Solos, 1999.

ORTIZ, J. L. **Emprego do geoprocessamento no estudo da relação entre potencial produtivo de um povoamento de eucalipto e atributos do solo e do relevo**. 2003. Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-04122003-152239/>. Acesso em: 31 mar. 2021.

REZENDE, J. B.; PEREIRA, J. R.; BOTELHO, D. de O. Expansão da cultura do eucalipto nos municípios mineiros e gestão territorial. **Cerne**, v. 19, n. 1, p. 1–7, jan. 2013. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-77602013000100001&lng=en&nrm=iso&tlng=pt>. Acesso em: 31 mar. 2021.

ROCHA, G. N.; GONÇALVES, J. L. M.; MOURA, I. M. Mudanças da fertilidade do solo e crescimento de um povoamento de *Eucalyptus* grandis fertilizado com biossólido. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 28, n. 4, p. 623–639, 2004. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832004000400005&lng=en&nrm=iso&tlng=pt>. Acesso em: 31 mar. 2021.

SÁTIRO, T. P. de O. et al. Metodologia para a elaboração de mapa de potencialidade para a silvicultura com base em álgebra de mapas - A porção paulista da bacia do Rio Paraíba Do Sul, Brasil. **Geociencias**, v. 32, n. 4, p. 746–759, 1 jan. 2013. Disponível em: <http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/GEOSP/article/view/7286>. Acesso em: 31 mar. 2021.

SILVEIRA, R. L. V. de A.; HIGASHI, E. N. Seja o doutor do seu eucalipo. **Arquivo do agrônomo potafos**, v. 12, n. 93, p. 32, 2001. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0006-87051993000100007&lng=pt&tlng=pt>.

VIANA, F. et al. Distribuição espacial de plantios de eucalipto no trecho paulista da bacia hidrográfica Rio Paraíba do Sul, SP, Brasil Spatial distribution of *Eucalyptus* plantations in the São Paulo State portion of Paraíba do Sul river basin, Brazil. **Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 5, n. 3, p. 133–146, 2010. Disponível em: <www.ambi-agua.nettel.:>. Acesso em: 31 mar. 2021.

Equipe Editorial

Editor Chefe / Editor in Chief

Prof. Dr. Paulo Henrique Müller Silva, IPEF - Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, Piracicaba, SP

Conselho Editorial / Editorial Board

Dr. Arno Brune, GP Pusaka, Bintulu, Malásia

Prof. Dr. Edson Luiz Furtado, Unesp - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, SP, Brasil

Dr. Gustavo Pedro Javier Oberschelp, INTA - Instituto Nacional de Tecnologia Agropecuaria, Concordia, Argentina

Prof. Dr. José Antônio Aleixo da Silva, UFRPE - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, PE, Brasil

Prof. Dr. Rinaldo César de Paula, Unesp -Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Jaboticabal, SP, Brasil.

Editor de Inglês / English Editor

Dr. Arno Brune, GP Pusaka, Bintulu, Malásia

Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF)

Douglas Seibert Lazaretti (Suzano S.A.) - Presidente

Carlos Augusto Soares do Amaral Santos (Klabin S/A) - Vice-Presidente

Empresas Associadas Mantenedoras / Partners

Aperam BioEnergia Ltda

ArcelorMittal BioFlorestas Ltda.

AVB - Aço Verde do Brasil SA

Bracel SP Florestal Ltda.

Celulose Nipo-Brasileira S/A (Cenibra)

CMPC Celulose Riograndense Ltda

Duratex Florestal Ltda.

Eldorado Brasil Celulose S/A

Eucatex S/A Indústria e Comércio

Forestal Oriental

Gerdau Aços Longos S.A.

International Paper do Brasil Ltda

Klabin S/A

Ramires Reflortec S/A

Suzano S.A.

Vallourec Florestal Ltda.

Veracel Celulose S.A.

WestRock, Celulose, Papel e Embalagens Ltda.

INSTITUTO DE PESQUISAS
E ESTUDOS FLORESTAIS