

**CONJUNTO DE FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS PARA
ANÁLISES AGROCLIMÁTICAS**

MOISÉS SAVEDRA OMÊNA

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE
DARCY RIBEIRO**

**CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
NOVEMBRO – 2014**

**CONJUNTO DE FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS PARA
ANÁLISES AGROCLIMÁTICAS**

MOISÉS SAVEDRA OMÊNA

Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Elias Fernandes de Sousa.
Coorientador: Prof. Alexandre Rosa dos Santos.

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
NOVEMBRO – 2014

FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do **CCTA / UENF** 001/2015

Omena, Moisés Savedra

Conjunto de ferramentas computacionais para análises agroclimáticas / Moisés Savedra Omena. – 2014.

106 f. : il.

Orientador: Elias Fernandes de Sousa.

Dissertação (Mestrado - Produção Vegetal) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias. Campos dos Goytacazes, RJ, 2014.

Bibliografia: f. 83 – 89.

1. Geoprocessamento 2. Balanço hídrico normal climatológico 3. Recursos hídricos 4. Coffea I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias. II. Título.

CDD – 630.2515

CONJUNTO DE FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS PARA ANÁLISES AGROCLIMÁTICAS

MOISÉS SAVEDRA OMÊNA

Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal.

Aprovada em 05 de novembro de 2014

Comissão Examinadora

Prof. Silvio de Jesus Freitas (D.Sc., Produção Vegetal) - UENF

Ricardo Ferreira Garcia (D.Sc., Engenharia Agrícola) - UFV

Prof. Alexandre Rosa dos Santos (D.Sc., Engenharia Agrícola) - UFV
Coorientador

Prof. Elias Fernandes de Sousa (D.Sc., Produção Vegetal) - UENF
Orientador

Primeiramente a DEUS por tudo que é e representa em minha vida, Também a minha amada esposa, aos meus pais e a toda família, que com honra e amor, souberam lutar contra as dificuldades, me ensinar a dar valor às pequenas coisas, e a perceber como elas são grandes.

AGRADECIMENTOS

A DEUS pelo dom da vida, por possibilitar mais esta vitória e por todo amor mesmo em meio às dificuldades. Toda Honra e Toda Glória pertencem a ELE;

A Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias – CCTA e ao Laboratório de Engenharia Agrícola – LEAG, pela oportunidade de realização deste projeto;

Ao meu orientador, professor Elias Fernandes de Sousa, pela oportunidade, pela compreensão, pelos ensinamentos, pela visão estratégica, além do grande incentivo e da amizade;

Ao meu coorientador professor Alexandre Rosa dos Santos, que impulsionou meu interesse pela pesquisa e produção científica, bem como o

aprendizado em SIG e Sensoriamento Remoto, além de ter sido um dos principais incentivadores na realização deste mestrado e amigo durante todo o processo;

Ao Prof. Flávio Eymard Rocha Penna, pelo grande incentivo na realização de pesquisas e pela amizade;

Ao Prof. José Carlos Mendonça pela oportunidade de trabalhos com Sensoriamento Remoto aplicados à região de Campos dos Goytacazes;

Aos professores do programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal pelas aulas e preciosas explicações neste campo do saber;

Ao Instituto Federal do Espírito Santo - IFES;

A minha amada esposa Mariana, que mesmo em momentos difíceis esteve ao meu lado nesta caminhada;

Aos meus pais José Genival de Omêna e Elisabete Araújo Savedra Omêna e a todos os familiares, pelas correções, pelo apoio e pelos valores atribuídos durante cada dia de vida;

Aos amigos e às amigas do curso pelo apoio e conhecimento compartilhado;

Aos funcionários e às funcionárias da Pós-Graduação em Produção Vegetal;

A todos(as) que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	v
LISTA DE FIGURAS	vii
RESUMO	x
ABSTRACT	xii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1 Importância da cafeicultura	4
2.2 Cultivo do café	9
2.3 Fenologia do café	13
2.4 Balanço hídrico	15
2.5 Sistemas de informações geográficas (SIG).....	17
3. MATERIAIS E MÉTODOS	20
3.1 Área de estudo.....	21
3.2 Mapas de informações base	22
3.3 Mapas resultantes do balanço hídrico normal climatológico	28
3.4 Análises para a cultura do café na área de estudo	34
3.4.1 Normalização dos dados	36
3.4.2 Obtenção das faixas preferenciais, zoneamento agroclimatológico e conclusões	37
3.5 Visão geral dos processos realizados.....	37
3.5.1 Levantamento bibliográfico e obtenção dos dados.....	37
3.5.2 Tratamento dos dados e geração dos mapas	37

3.5.3	Algoritmos de obtenção do balanço hídrico, déficit de evapotranspiração e correlações	38
3.5.4	Classificação e normalização dos dados.....	38
3.5.5	Faixas preferenciais, zoneamento agroclimatológico e conclusões ..	38
3.5.6	Fluxograma de visão geral dos processos	39
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40
4.1	Mapas de altitude, longitude e latitude.....	40
4.2	Mapas de temperatura e precipitação.....	42
4.3	Mapa de solos e capacidade de água disponível (CAD).....	44
4.4	Mapa de localização do café.....	46
4.5	Mapas resultantes do balanço hídrico climatológico.....	47
4.5.1	Mapas de evapotranspiração potencial (ETP).....	47
4.5.2	Mapas de precipitação menos evapotranspiração potencial (P-ETP) 48	
4.5.3	Mapas de negativo acumulado (NEG.ACUM) e armazenamento de água no solo (ARM)	49
4.5.4	Mapas de alteração (ALT)	50
4.5.5	Mapas de evapotranspiração real (ETR).....	51
4.5.6	Mapas de deficiência hídrica (DEF).....	52
4.5.7	Mapas de excedente hídrico (EXC).....	53
4.5.8	Mapas de déficit de evapotranspiração relativa	54
4.6	Mapas de temperatura para o café	56
4.6.1	Mapas de deficiência hídrica para o café	60
4.6.2	Mapas de altitude para o café	63
4.6.3	Mapas de déficit de evapotranspiração relativa para o café.....	66
4.7	Mapas de valores preferenciais versus valores aptos apresentados na literatura e zoneamento para o café arábica	70
5.	CONCLUSÕES.....	73
6.	APÊNDICE.....	75
6.1	Mapas de aferições do balanço hídrico normal climatológico	76
6.1.1	Mapa de aferição com base no somatório da alteração	77
6.1.2	Mapa de aferição entre precipitação e evapotranspiração.	77
6.1.3	Mapa de aferição entre as variáveis de evapotranspiração potencial, evapotranspiração real e deficiência hídrica.	78
6.1.4	Mapa de aferição entre precipitação, evapotranspiração real e excedente hídrico.....	80
7.	TRABALHOS FUTUROS.....	81
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Comparativo de produção do café beneficiado no Brasil desde 2004, e estimativa para o ano de 2014.

Tabela 2. Evolução da produção de café arábica e conilon nos últimos doze anos e a estimativa para o ano de 2014, no Espírito Santo.

Tabela 3. Faixas de aptidões térmicas e hídricas para a cultura do café, observadas para as espécies conilon (*coffea canephora*), e arábica (*coffea arabica*), segundo Matiello (1991).

Tabela 4. Faixas de deficiência hídrica para as culturas do café arábica (*coffea arabica*), e conilon (*coffea canephora*), referentes ao zoneamento agrícola para a cultura de café no Estado de Rondônia.

Tabela 5. Faixas de temperatura para as culturas do café arábica (*coffea arabica*), e conilon (*coffea canephora*), referentes ao zoneamento agrícola para a cultura do café no Estado de Rondônia.

Tabela 6. Faixas consideradas aptas referentes às características térmica e hídrica para a cultura do café, observadas para as espécies conilon (*coffea canephora*), e arábica (*coffea arabica*), para o Espírito Santo, segundo Brasil (2011).

Tabela 7. Faixas de aptidão térmica para a cultura do café, observadas para as espécies conilon (*coffea canephora*), e arábica (*coffea arabica*), segundo Matiello et al. (2002).

Tabela 8. Faixas de aptidão hídrica para a cultura do café, observadas para as espécies conilon (*coffea canephora*), e arábica (*coffea arabica*), segundo Matiello et al. (2002) e Santinato et al. (2008).

Tabela 9. Coeficientes mensais para as regressões lineares múltiplas de temperatura média do ar na bacia hidrográfica do rio Itapemirim.

Tabela 10. Tipos de textura dos solos observados por meio da classificação da EMBRAPA para a bacia hidrográfica do rio Itapemirim.

Tabela 11: Faixas de aptidão térmica para a cultura do café, observadas para as espécies conilon (*coffea canephora*), e arábica (*coffea arabica*), segundo Matiello (1991) e Matiello et al. (2002).

Tabela 12: Faixas de aptidão hídrica para a cultura do café, observadas para as espécies conilon (*coffea canephora*), e arábica (*coffea arabica*), segundo Matiello (1991), Matiello et al. (2002) e Santinato et al. (2008).

Tabela 13: Faixas de altitude recomendadas para a cultura do café, observadas para as espécies conilon (*coffea canephora*), e arábica (*coffea arabica*), segundo Brasil (2011).

Tabela 14. Tipos de solos que ocorrem na bacia hidrográfica do rio Itapemirim ordenados conforme maiores representações percentuais.

Tabela 15: Comparações entre as áreas preferenciais obtidas por meio das análises realizadas na bacia hidrográfica do rio Itapemirim e os valores recomendados na literatura.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Componentes do balanço hídrico para condições naturais.

Figura 2. ArcGIS e GvSIG – Exemplos de Sistemas de Informações Geográficas.

Figura 3. Sistemas de Informações Geográficas, suas possibilidades de representação, organização e armazenamento de informações (Adaptada de ESRI,2010).

Figura 4. Localização da área de estudo.

Figura 5. Estações Meteorológicas de onde foram obtidos os dados base utilizados para análises realizadas na bacia hidrográfica do rio Itapemirim.

Figura 6. Destaque das folhas SRTM 1:250.000 em sistema de coordenadas geográficas e Datum WGS84 para o Estado do Espírito Santo, utilizadas neste trabalho. Fonte: adaptado da EMBRAPA e Miranda (2005).

Figura 7. Tabela de campos e dados resultantes do processo de conversão de UTM para Lat/Long por meio do módulo LatLongUTMconversion do Python em conjunto com os algoritmos desenvolvidos.

Figura 8. Visão geral dos procedimentos desenvolvidos no trabalho.

Figura 9. Modelo Digital de Elevação da bacia hidrográfica do rio Itapemirim.

Figura 10. Ocorrência de latitudes para a área de estudo.

Figura 11. Ocorrência de longitudes para área de estudo.

Figura 12. Resultados mensais de temperatura para cada pixel da bacia hidrográfica do rio Itapemirim.

Figura 13. Mapas mensais de precipitação para a bacia do rio Itapemirim.

Figura 14. Tipos de solos que ocorrem na Bacia do Rio Itapemirim.

Figura 15. Mapa de Capacidade de Armazenamento (CAD), para a bacia hidrográfica do rio Itapemirim.

Figura 16. Mapa de Ocorrência do Café para a bacia hidrográfica do rio Itapemirim.

Figura 17. Mapas de Evapotranspiração Potencial para a bacia hidrográfica do rio Itapemirim.

Figura 18. Mapas resultantes do processo de cálculo entre os dados de Precipitação menos Evapotranspiração Potencial pixel a pixel.

Figura 19. Mapas resultantes para o processo de cálculos pixel a pixel para Negativo Acumulado.

Figura 20. Mapas resultantes para o processo de cálculos pixel a pixel para Armazenamento de Água no Solo.

Figura 21. Mapas resultantes para o processo de cálculos pixel a pixel para a alteração de água no solo.

Figura 22. Mapas resultantes para o processo de cálculos pixel a pixel para a Evapotranspiração Real.

Figura 23. Mapas resultantes para o processo de cálculos pixel a pixel para a Deficiência Hídrica.

Figura 24. Mapas resultantes para o processo de cálculos pixel a pixel para Excedente Hídrico.

Figura 25. Déficit de Evapotranspiração Relativa pixel a pixel para a bacia hidrográfica do rio Itapemirim.

Figura 26. Valores máximos, médios e mínimos anuais além do somatório de todos os valores mensais para temperatura nos pixels de ocorrência do café.

Figura 27. Temperaturas médias para todos os pixels da área de estudo, versus temperaturas médias nos pixels de ocorrência do café. Os valores concentram-se em grande parte de 17 e 26°C, com destaque para 19 a 21°C e 24 a 26°C.

Figura 28. Normalização das temperaturas médias para todos os pixels de ocorrência do café em função dos pixels totais da área de estudo. Os resultados apresentaram as classes de 19 a 21°C como preferenciais para o café.

Figura 29. Normalização das temperaturas máximas para todos os pixels de ocorrência do café em função dos pixels totais da área de estudo. Os intervalos de 21 a 24°C indicam as máximas preferenciais para o café na área de estudo.

Figura 30. Normalização das temperaturas mínimas para todos os pixels de ocorrência do café em função dos pixels totais da área de estudo. Os intervalos de 15 a 18°C indicam as mínimas preferenciais para o café na área de estudo.

Figura 31. Valores máximos, médios e mínimos anuais além do somatório de todos os valores mensais para deficiência hídrica nos pixels de ocorrência do café.

Figura 32. Somatório de Deficiência Hídrica para todos os pixels de ocorrência do café em função dos pixels totais da área de estudo. As classes mais proeminentes estão entre 0 e 72 mm de deficiência.

Figura 33. Somatório de deficiência hídrica normalizado para todos os pixels de ocorrência do café em função dos pixels totais da área de estudo. Os intervalos até 48 mm foram os preferenciais para a cultura do café na área de estudo.

Figura 34. Deficiência hídrica máxima mensal e normalizada para todos os pixels de ocorrência do café em função dos pixels totais da área de estudo. Os valores preferenciais ocorreram entre 3 e 18mm de deficiência hídrica.

Figura 35. Gráfico de altitude geral x localização do café para todos os pixels de ocorrência do café em função dos pixels totais da área de estudo. As faixas com maior destaque foram as de 0 a 180 metros e 660 a 900 metros.

Figura 36. Gráfico de altitude normalizado para todos os pixels de ocorrência do café em função dos pixels totais da área de estudo. As altitudes entre 660 e 1020 foram as preferenciais para o café na área de estudo.

Figura 37. Identificação de importantes altitudes na distribuição do café para a área de estudo.

Figura 38. Principais classes em destaque para o déficit de evapotranspiração relativa do café na área de estudo. Destacando-se que quanto mais próximo de 0 (zero), menores as restrições por déficit de evapotranspiração relativa.

Figura 39. Identificação das ocorrências preferenciais para o déficit de evapotranspiração relativa nos pontos de localização do café para a área de estudo.

Figura 40. Gráfico de déficit de evapotranspiração relativa normalizado para todos os pixels de ocorrência do café em função dos pixels totais da área de estudo. Os resultados preferencias foram observados entre 0 e 0,06.

Figura 41. Mapa de valores preferenciais obtidos por meio das análises resultantes deste trabalho, versus valores apresentados na literatura como aptos para a cultura do café arábica. As áreas indicadas pelas faixas preferenciais apresentaram maior concentração de café, enquanto nas áreas recomendadas pela literatura, observa-se uma localização mais dispersa da cultura.

Figura 42. Mapa de zoneamento de aptidão do café arábica para a área de estudo considerando as faixas de aptidão preferenciais obtidas para a bacia hidrográfica do rio Itapemirim (verde), as faixas de aptidão recomendadas pela literatura (amarelo) e as faixas consideradas inaptas (vermelho).

Figura 43: Mapa de Aferição do somatório de Alteração para todos os meses em todos os pontos da bacia hidrográfica do rio Itapemirim. Os resultados obtidos apresentaram alta precisão e pertinência.

Figura 44. Mapa de Aferição dos Somatórios de P-ETP + (P-ETP), para a bacia hidrográfica do rio Itapemirim.

Figura 45. Aferição dos Somatórios de Evapotranspiração Potencial menos Evapotranspiração Real mais Deficiência Hídrica para a bacia hidrográfica do rio Itapemirim.

Figura 46. Mapa de Aferição dos Somatórios de Precipitação menos Evapotranspiração Real mais Excedente Hídrico para a bacia hidrográfica do rio Itapemirim.

RESUMO

OMÊNA, M. S. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Novembro de 2014. Conjunto de Ferramentas Computacionais Para Análises Agroclimáticas. Professor Orientador: Elias Fernandes de Sousa.

O café é uma importante cultura para o estado do Espírito Santo, sendo responsável por 43,6% do valor bruto da produção (VBP) agropecuária desta unidade da federação. A bacia hidrográfica do rio Itapemirim, localizada na região sul capixaba, destaca-se como uma das principais regiões produtoras da espécie arábica (*Coffea arabica*), mas também possui relevante produção da espécie conilon (*Coffea canephora*). O balanço hídrico normal climatológico de Thornthwaite & Mather é um dos principais métodos utilizados em aplicações na área de agrometeorologia para auxílio em análises de cultura e zoneamento agroclimatológico. As chuvas e/ou a irrigação são consideradas como as principais vias de entrada de água no sistema, sendo a evapotranspiração e/ou a drenagem profunda consideradas as principais vias de saída. Entretanto, para a espacialização dos resultados do balanço hídrico climatológico, de forma que seja possível a análise em grandes áreas, normalmente são utilizadas técnicas de interpolações realizadas através de sistemas de informações geográficas (SIG), que utilizam como informações base os valores necessários aos cálculos do balanço hídrico obtidos por meio dos dados de estações meteorológicas e processados para um único ponto que normalmente é a própria localização da

estação. Tal forma de processamento, visto que poucos pontos são utilizados como representativos para toda a área em análise, comumente desconsidera diversos aspectos relevantes da área de estudo que sofrem variação entre os pontos de coleta de informações. Assim, neste trabalho, sugeriu-se uma nova abordagem automatizada que possibilitou a realização dos cálculos e aferições para toda a área proposta com maior precisão, utilizando-se de uma malha com, aproximadamente, 700 mil pontos, incluindo a utilização de múltiplas variáveis no processo de geração dos valores resultantes, com a finalidade de se obter dados mais fidedignos e condizentes com a realidade estudada. O método de Thornthwaite & Mather foi processado para toda a área de estudo e os resultados obtidos, bem como suas aferições foram satisfatórios e possibilitaram a realização de análises agroecológicas para a cultura do café com maior acurácia na região analisada. Foram obtidos valores de temperatura, deficiência hídrica, déficit de evapotranspiração relativa e altitude bastante apropriados para o plantio da cultura em estudo na maior parte da bacia do rio Itapemirim.

Palavras-chave: Geoprocessamento, Balanço Hídrico Normal Climatológico, Recursos Hídricos, *Coffea*.

ABSTRACT

OMÊNA, M.S. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. November, 2014. Set of Computational Tools for Agroclimatic Analysis. Advisor: Elias Fernandes de Sousa.

Coffee is an important crop for the state of Espírito Santo, accounting for 43.6% of the Gross Value of Production (GVP) in this agricultural unit of the federation. The Itapemirim river basin, located in the southern region of the state, stands out as one of the major regions producing of the Arabica species (*Coffea arabica*), but also has significant production of the Conilon species (*Coffea canephora*). The water balance normal climatological of Thornthwaite & Mather is one of the main methods used in applications in the area of agro-meteorology to aid in the analysis of culture and zoning agro climatological. Rainfall and irrigation are considered as the main routes of entry of water into the system, and evapotranspiration and deep drainage are considered the main exit routes. However, the results for the spatial distribution of water balance climatological, so that it is possible to analyze large areas, implements interpolation techniques in Geographic Information Systems (GIS), using as a basis of the information data required the values for of the calculations, those data obtained by meteorological stations and processed to a single point which usually is the same location of the stations. This processing, commonly ignores several important aspects of the study area who occurring between the varying points of information gathering since fewer points are used as representative for the entire area under

consideration. In this work, it was suggested a new automated approach allowing more accurately the calculations and measurements for the analyzed area, using a mesh with approximately 700 thousand points, including the use of multiple process variables in generation of resultant values, in order to obtain more confiability and consistence this data result. The method of Thornthwaite & Mather has processed for the entire study area and the results obtained as well as their measurements were satisfactory and enabled the realization of agroecological analysis to the coffee culture with greater accuracy in the region analyzed. Values of temperature, water stress, relative evapotranspiration deficit and altitude obtained, are quite suitable for the planting of the crop under study in most of the Itapemirim river basin.

Keywords: GIS, Normal Climatological Water Balance, Water Resources, Crop Coffee.

1. INTRODUÇÃO

O café é um dos mais importantes produtos da agricultura brasileira, comercializado tanto no mercado nacional como no internacional. Tal cultura tem se destacado econômica e socialmente no país desde a chegada das primeiras mudas em meados do século XVIII e ocupa atualmente a 5ª posição entre os produtos mais exportados. O Brasil está na vanguarda das pesquisas cafeeiras e lidera o ranking mundial de produção do café, tendo alcançado a marca de 49,15 milhões de sacas em 2013, o que representou 33,85% da produção mundial. O café arábica (*coffea arabica*) representa 72% da produção nacional, sendo o conilon (*coffea canephora*) responsável por 28% do total produzido. O estado de Minas Gerais é o maior produtor de arábica, sendo o Espírito Santo o maior produtor de conilon (BRASIL, 2011; OIC, 2014; MAPA, 2014; CONAB, 2014).

De um modo geral, a cafeicultura é responsável por cerca de 43,6% do valor bruto de produção agropecuária do Espírito Santo, sendo, portanto, uma cultura de fundamental importância. O estado é o segundo maior produtor de café do Brasil, e destaca-se principalmente na produção de café conilon, sendo responsável por aproximadamente 76% de toda produção desta espécie no país, além de obter o terceiro lugar na produção de arábica, atrás apenas de Minas Gerais e São Paulo (INCAPER, 2009).

O café possui exigências climáticas específicas, e as faixas recomendadas para as espécies foram estabelecidas por vários autores em diversos estudos. As variáveis enfatizadas como sendo de primordial importância são a temperatura, a deficiência hídrica e a altitude, por meio das quais, é possível realizar o zoneamento agroecológico da cultura abordada, visando identificar regiões climaticamente favoráveis, e possibilitando o planejamento e a implantação de atividades agrícolas correlatas (BRASIL, 2011).

Entretanto, para obtenção das áreas aptas ao plantio de determinada cultura, normalmente faz-se necessária a espacialização dos dados climatológicos observados em uma determinada região, e neste sentido, tem sido de primordial importância o uso dos sistemas de informações geográficas (SIG), que possibilitam a análise dos mais diversos cenários de forma abrangente e consistente, por meio da organização, do armazenamento, da distribuição espacial, da edição e do processamento de dados georreferenciados, provendo um conjunto de ferramentas abrangentes que proporcionam melhor planejamento, análise e tomada de decisões, com base nos mais diversos parâmetros (ESRI, 2012; CAMARA et al. 2004).

Sabe-se também que a água é de fundamental importância para o desenvolvimento das plantas e, portanto, é essencial avaliar sua disponibilidade para a cultura em questão na área em análise. Nesse contexto, o balanço hídrico normal climatológico de Thornthwaite & Mather (1955), tem sido um dos principais métodos utilizados em aplicações no âmbito da agrometeorologia para o cálculo das entradas e saídas de água de um sistema, possibilitando assim importantes análises relativas à questão hídrica e sua disponibilidade. Nesta metodologia, as chuvas e/ou a irrigação são consideradas como as principais vias de entrada de água no sistema, sendo a evapotranspiração e/ou a drenagem profunda consideradas as principais vias de saída.

É importante observar ainda, que métodos como o supracitado, normalmente envolvem certa complexidade em termos de cálculos, e comumente são adotadas planilhas eletrônicas customizadas para este fim. Tais instrumentos possibilitam obter a solução adequada para um único ponto, com base nas informações provenientes de determinada estação meteorológica.

Posteriormente, estes dados pontuais são interpolados para obtenção da espacialização almejada. Contudo, apesar de sua complexidade, tais métodos podem ser modelados e otimizados por meio de linguagens de programação utilizadas conjuntamente com o SIG, permitindo a realização dos cálculos necessários, pixel a pixel, e possibilitando a obtenção dos resultados para áreas ao invés de valores pontuais, implicando assim, em dados mais fidedignos e condizentes com a realidade, além de possibilitar efetuar as aferições necessárias para toda a área envolvida.

Assim, o presente trabalho teve por objetivo, realizar o balanço hídrico normal climatológico de forma automatizada e pixel a pixel, utilizando-se da construção de rotinas computacionais em um SIG para execução dos processos e cálculos envolvidos, considerando os aproximadamente setecentos mil pixels presentes na região da bacia hidrográfica do rio Itapemirim. Posteriormente, com base nos resultados obtidos, foram realizadas análises agroecológicas sobre a cultura do café para toda área em estudo, visto que esta contempla com significativa expressão o cultivo das espécies arábica (*coffea arabica*), e conilon (*coffea canephora*), na busca das relações mais proeminentes entre a cultura estudada e os parâmetros de altitude, temperatura, déficit de evapotranspiração relativa e deficiência hídrica, para cada um dos pixels da bacia nos locais onde ocorre a referida cultura. Foi utilizado o Sistema de Informações Geográficas ArcGIS 10 e sua biblioteca de extensão para a linguagem Python denominada Arcpy, que conjuntamente possibilitaram o desenvolvimento das funções computacionais para manipulação de mapas pixel a pixel e a completa execução dos procedimentos necessários à obtenção dos resultados, permitindo efetuar os cálculos e as aferições na área de estudo, por meio do método escolhido, com pertinência, eficácia e alta acurácia.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Importância da cafeicultura

Atualmente, o café é um dos mais importantes produtos agrícolas brasileiros comercializados nos mercados nacional e internacional, tendo a cultura, grande destaque dentro do agronegócio da nação. O país está na vanguarda das pesquisas cafeeiras, o que tem proporcionado maior competitividade no mercado, elevada sustentabilidade no agronegócio e liderança mundial na produção do café (BRASIL, 2011; OIC, 2014).

O café é originário da Etiópia, região central da África onde ainda hoje ocorre como parte da vegetação natural. A Arábia foi a responsável pela propagação da cultura, e o nome originou-se da palavra árabe qahwa, que significa vinho. Por esse motivo, ele era conhecido como "vinho da Arábia" quando chegou à Europa no século XIV. Inicialmente os árabes detiveram o completo controle sobre o cultivo e a preparação da bebida, mantendo os processos em segredo. Posteriormente, entretanto, os holandeses conseguiram as primeiras mudas e iniciaram o plantio na ilha de Java no ano de 1699, o que encorajou outros países a tentarem o mesmo. A França iniciou suas experiências nas ilhas Sandwich e Bourbon após o burgomestre de Amsterdã ser presenteado

com a planta. A partir das experiências holandesa e francesa, o cultivo foi levado para outras colônias europeias (ABIC, 2014).

Segundo o Ministério da Agricultura (MINAGR, 2013), o café destacou-se econômica e socialmente no Brasil desde a chegada das primeiras mudas em meados do século XVIII vindas da Guiana Francesa. A planta teve rápida adaptação ao clima e solo, de forma que o produto adquiriu notória importância no mercado, tornando-se um dos principais itens de exportação desde a época do império. Inicialmente os estados produtores foram Pará e Maranhão, mas hoje, a cultura se estende por 15 estados, destacando-se neste contexto Minas Gerais, Espírito Santo, São Paulo, Bahia, Paraná e Rondônia. O país produz diferentes tipos de café atendendo a variadas demandas mundiais, e inclusive, possui cafés com características especiais.

O setor cafeeiro conta com o Fundo de Defesa da Economia Cafeeira (FUNCAFÉ), criado pelo decreto lei nº 229586 e estruturado pelo decreto nº 94874/87, que se destina ao desenvolvimento de pesquisas, incentivo a produtividade e competitividade dos setores de produção, bem como a qualificação da mão de obra e outros assuntos de importância no que tange à cultura analisada (MINAGR, 2013).

O Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2014), prevê uma produção estimada para 2014 em 44,6 milhões de sacas de café, sendo a produção brasileira responsável por 31,1% das exportações mundiais. No ranking de exportações totais do agronegócio brasileiro, a cultura foi responsável de janeiro a julho de 2013 por um total de US\$ 3129,15 milhões com participação em 5,3% das exportações. No mesmo período do ano corrente, o café apresentou uma variação positiva de 11,6%, passando para US\$ 3493,03 milhões e representando 5,9% das exportações do país, sendo considerado o quinto produto no ranking das exportações brasileiras, ficando atrás apenas da soja (41%), carnes (16,7%), produtos florestais (9,8%) e complexo sucroalcooleiro (9,5%). No tocante à produção, o Brasil lidera o ranking mundial e alcançou 49,15 milhões de sacas em 2013, o que representou 33,85% da produção mundial, sendo exportadas 32,01 milhões de sacas, correspondendo a 29,41% das exportações mundiais. O café conilon (tipo 7BC), teve cotação média anual de R\$

241,60 em 2013 e segundo o computo de valores até Julho de 2014 o valor médio apresentou-se em R\$ 251,57 para a Base Vitória-ES. Já, o arábica (tipo C, interno 500), teve preço médio em 2013 de R\$ 242,68 e o computo até julho de 2014 foi de 257,46 para a Base Vitória-ES (MAPA, 2014).

Em 2013, Minas Gerais foi responsável por 56,27% da produção nacional de café, e destacou-se como o principal produtor de café arábica, respondendo pelo montante de 71,51% da produção do país relativa a esta espécie. Já, o Espírito Santo, foi o maior produtor de café conilon, sendo responsável por 75,57% da produção deste, e ocupando também a posição de segundo maior produtor do país, respondendo assim, pelo total de 23,80% da produção nacional (MAPA,2014; CONAB, 2014). Para 2014, segundo os levantamentos realizados até maio deste ano por meio do convênio MAPA - SPAE / CONAB, o estado de Minas Gerais vem sendo responsável por 51,59% da produção nacional e por 70,41% da produção total do café arábica do país, sendo o Espírito Santo responsável por 27,39% da produção total do país, destacando-se com 75,82% da produção geral do café conilon (MAPA,2014; CONAB, 2014).

A área plantada em produção com as espécies arábica e conilon totalizou 2267,57 bilhões de hectares no Brasil em 2014. Os resultados mostraram uma redução de 1,90% na área plantada de 2014, em relação a 2013, ocorrendo, portanto uma redução de 44,02 bilhões de hectares (CONAB, 2014).

Na Tabela 1 é possível observar no comparativo de produção do café beneficiado em milhões de sacas para o Brasil, desde 2004, que a estimativa para o ano de 2014 é menor que 2013, representando uma redução 9,33% ou 4,58 milhões de sacas quando comparada com a produção de 2013 (CONAB, 2014).

É relevante observar também, que as diferenças nos últimos anos entre as safras de alta e baixa bienalidade vinham diminuindo, e tal redução estava sendo atribuída a diversos fatores, destacando-se os tratos culturais mais adequados, o crescente aumento na utilização de irrigação, o manejo de podas nos cafeeiros, os esqueletamentos, o adensamento das lavouras, o plantio de variedades mais produtivas e melhores adaptadas, e por fim, a renovação constante dos cafezais (CONAB, 2013). Entretanto, para 2014 houve uma quebra

nesta tendência, pois as duas últimas safras são de baixa produção quando comparadas ao ciclo de bienalidade que ocorria desde 2005 (CONAB, 2014).

Tabela 1. Comparativo de produção do café beneficiado no Brasil desde 2004, e estimativa para o ano de 2014.

Safr	Arábica	Conilon	Total
	milhões sacas	milhões sacas	milhões sacas
2004	31,71	7,56	39,27
2005	23,81	9,13	32,94
2006	33,01	9,5	42,51
2007	25,1	10,97	36,07
2008	35,48	10,51	45,99
2009	28,87	10,6	39,47
2010	36,82	11,27	48,09
2011	32,19	11,29	43,48
2012	38,34	12,48	50,82
2013	38,29	10,86	49,15
2014 (*)	32,23	12,33	44,56

Fonte: CONAB (2014).

Apesar de o Espírito Santo ficar em 3º lugar no ranking nacional do café arábica (perdendo apenas para Minas Gerais e São Paulo), no contexto qualitativo o arábica capixaba obtém destaque, sendo conhecido mundialmente como o “Café das Montanhas do Espírito Santo”, e exportado para países da Europa e também Estados Unidos. De um modo geral, a cafeicultura é responsável por 43,6% do valor bruto da produção (VBP) agropecuária do Espírito Santo, com o arábica especificamente representando 9,3% do VBP capixaba (INCAPER, 2009).

No levantamento realizado pela CONAB em parceria com o INCAPER, a previsão de safra do café em 2011/2012 no estado do Espírito Santo, foi estimada em 11,022 milhões de sacas, sendo o efetivo resultado 11,573 milhões. De acordo com a CONAB (2013), fazendo um paralelo entre a produção de 2012 e 2013, verificou-se haver um acréscimo esperado de 2,67% na produção geral do estado (apesar da redução em âmbito nacional no mesmo ano), ocorrendo acréscimo de 18,82% para o café arábica e pequeno decréscimo, cerca de 2,0%, para o café conilon. Este acréscimo significativo na produção de café arábica, foi possível graças a renovação e revigoração das lavouras sobre novas bases

tecnológicas, apesar de as lavouras em 2012 não terem conseguido atingir a produtividade esperada (CONAB, 2013).

Já para a relação de produção entre 2013 e 2014, segundo CONAB (2014), verifica-se o acréscimo previsto de 4,37% na produção geral do Espírito Santo, com decréscimo de 18,01% para o café arábica e o acréscimo de 13,87% para o café conilon, atribuindo-se o significativo decréscimo na produção do arábica a ocorrência de uma grande safra em 2013, a instabilidade e os baixos preços, os problemas climáticos envolvendo altas temperaturas e o déficit hídrico de janeiro a março de 2014. Portanto, os fatores como a bienalidade pronunciada, associada à instabilidade e os preços baixos, levaram parte dos produtores a diminuir as adubações e os tratamentos culturais, bem como a realizarem podas intensas nas lavouras. O acréscimo de produção para o café conilon em 2014, deve-se ao fato do Programa de Renovação e Revigoração de Lavouras, a baixa produção de 2013, ao elevado vigor das plantas, bem como adequada floração e fertilização, além das condições climáticas favoráveis na região norte do estado, que é responsável por cerca de 80% da produção do café capixaba.

Tabela 2. Evolução da produção de café arábica e conilon nos últimos doze anos e a estimativa para o ano de 2014, no Espírito Santo.

Safras	Arábica	Conilon	Total
	Milhões sacas	Milhões sacas	Milhões sacas
2002	2,50	6,82	9,32
2003	1,60	5,01	6,61
2004	2,29	4,50	6,79
2005	2,05	6,01	8,07
2006	2,12	6,88	9,00
2007	2,01	7,56	9,58
2008	2,86	7,36	10,23
2009	2,60	7,60	10,20
2010	2,74	7,33	10,07
2011	3,07	8,49	11,57
2012	2,78	9,71	12,50
2013	3,48	8,21	11,69
2014(Est.)	2,85	9,35	12,20

Fonte: CONAB/INCAPER(2013/2014);

Na Tabela 2 é possível observar a evolução da produção estadual do café arábica e conilon nos últimos doze anos e, também, a previsão para o ano de 2014 referentes ao estado do Espírito Santo.

A produção do café arábica é uma das principais atividades das regiões Serrana e do Caparaó, e está presente em uma média de 20 mil propriedades, oferecendo trabalho a 53 mil famílias e gerando cerca de 150 mil empregos diretos, sendo que mais de 75% dos produtores que cultivam esse café são de base familiar, com área de plantio média estimada em 4,8 hectares, em altitudes que variam entre 400 a 1.200 metros (INCAPER, 2008).

Promover o desenvolvimento da cadeia produtiva do setor cafeeiro é uma das diretrizes do Novo Plano Estratégico de Desenvolvimento do Estado da Agricultura Capixaba (2007-2025), cujas principais estratégias são: elevar a produtividade ampliando sua base genética, bem como promover assistência técnica aos produtores e, estimular o associativismo para alcançar ganhos em valor e escala no âmbito da cadeia produtiva (INCAPER, 2009).

Segundo a Secretaria de Agricultura, Aquicultura e Pesca (SEAG), a produção do café arábica no estado estava estagnada e vislumbrando modificar este cenário, foi criado o programa “Renovar Arábica”, cujas principais metas são a renovação de 100% do parque cafeeiro de arábica em um prazo de 15 anos, por meio de variedades recomendadas pelas pesquisas científicas e com a utilização de boas práticas agrícolas. O Renovar Arábica está inserido no Programa Estadual de Cafeicultura Sustentável, elaborado com base no Novo Plano Estratégico de Desenvolvimento da Agricultura Capixaba, e vem recebendo apoio diversificado, dentre os quais se pode destacar o Consórcio Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento do Café (SEAG, 2009).

2.2 Cultivo do café

As faixas térmicas para o cultivo do café arábica foram estabelecidas por CAMARGO (1977), que indicou como área inapta os locais onde ocorrem temperaturas médias anuais superiores a 23°C e inferiores a 17°C. O autor considerou como área marginal aquelas que possuem temperaturas de 17 a 18°C

e de 22 a 23°C determinando, por fim, como áreas aptas onde há ocorrência de temperaturas médias anuais entre 18 a 22°C.

Regiões com temperatura média anual inferior a 18°C, em geral, têm o período de dormência das gemas florais retardado e o desenvolvimento dos frutos mais lento, o que faz com que o período de maturação seja coincidente com novo florescimento, dificultando a colheita (CAMARGO & PEREIRA, 1994). Também foram analisadas por CAMARGO (1977), as necessidades hídricas do cafeeiro e os balanços hídricos em diversas regiões de cultivo para estabelecer os limites para o *coffea arabica* com base no déficit hídrico anual. O autor definiu como áreas aptas para o cultivo sem irrigação, aquelas com deficiência hídrica anual inferior a 150 mm e as inaptas com déficit hídrico anual superior a 200 mm.

Já segundo MATIELLO (1991), as faixas por aptidão térmica e hídrica ideais para o cultivo do café conilon e arábica estão respectivamente entre 22,5 e 24°C, com menos de 200 mm, e entre 18 e 22,5°C, com menos de 150 mm. Os dados referentes a este estudo são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Faixas de aptidões térmicas e hídricas para a cultura do café, observadas para as espécies conilon (*coffea canephora*), e arábica (*coffea arabica*), segundo Matiello (1991).

	<i>Coffea canephora</i>	<i>Coffea arabica</i>	<i>Coffea canephora</i>	<i>Coffea arabica</i>
Apta	22,5 a 24,0 °C	18,0 a 22,5 °C	< 200 mm	< 150 mm
Restrita	20,0 a 22,5 °C	22,5 a 24,0 °C	200 a 400 mm	150 a 200 mm
Inapta	< 20,0 °C e > 24,0 °C	< 18,0 °C e > 24,0 °C	> 400 mm	> 200 mm

Fonte: Adaptada de Matiello (1991).

Para FAZUOLI (2012), a temperatura média ideal para o café conilon (ou robusta), ocorre entre 22 e 26°C, sendo que em temperaturas médias de 21°C o café conilon desenvolve-se, desde que não ocorram mínimas muito baixas, principalmente na época do florescimento. Já com referência ao fator hídrico, o autor cita que a experiência tem demonstrado, que o café arábica e o robusta suportam deficiências de até 150 mm anuais quando em solos profundos e de boas propriedades físicas, sendo que acima desse valor, a área pode ser considerada como marginal. Já segundo BRASIL (2008), por meio da Portaria Nº

195, DE 10 DE SETEMBRO DE 2008, Publicada no Diário Oficial da União de 11/09/2008, Seção 1, Página 12. Referente ao Zoneamento Agrícola para a cultura de café no Estado de Rondônia, ano-safra 2008/2009, as seguintes classes de disponibilidade hídrica anual (DHA) foram consideradas: DHA < 150 mm para café arábica e DHA < 200 mm para café conilon. Em termos de temperatura média anual (Ta), foram estabelecidas as seguintes classes: entre 18° e 23°C para café arábica e entre 22° e 26°C para café conilon. Por meio da Tabela 4 e Tabela 5 pode-se observar as faixas especificadas pelo documento supracitado.

Tabela 4. Faixas de deficiência hídrica para as culturas do café arábica (*coffea arabica*), e conilon (*coffea canephora*), referentes ao zoneamento agrícola para a cultura de café no Estado de Rondônia.

<i>Coffea arabica</i>		<i>Coffea canephora</i>	
Sequeiro	Irrigado	Sequeiro	Irrigado
DHA < 150 mm baixo risco	DHA > 150 mm	DHA < 200 mm baixo risco	DHA > 200 mm
DHA > 150 mm alto risco		DHA > 200 mm alto risco	

Fonte: Brasil (2008).

Tabela 5. Faixas de temperatura para as culturas do café arábica (*coffea arabica*), e conilon (*coffea canephora*), referentes ao zoneamento agrícola para a cultura do café no Estado de Rondônia.

<i>Coffea arabica</i>	<i>Coffea canephora</i>
Sequeiro / Irrigado	Sequeiro/Irrigado
Ta < 18°C - alto risco	Ta < 22°C - alto risco
18°C < Ta < 23°C - baixo risco	22°C < Ta < 26°C - baixo risco
Ta > 23°C - alto risco	Ta > 26°C - alto risco

Fonte: Brasil (2008).

Ainda segundo BRASIL (2011), por meio da Coordenação-Geral de Zoneamento Agropecuário, Portaria, n.º 79, de 25 de fevereiro de 2011, publicada no Diário Oficial da República Federativa do Brasil, nº 41, página 12, Seção 1, de 28 de fevereiro de 2011, referente ao zoneamento agrícola para a cultura de café no Estado do Espírito Santo, foram estabelecidas as classes de aptidão para a cultura do café arábica nesta unidade da federação, em cultivo de sequeiro ou irrigado, indicando sua prática apenas nas áreas com altitudes entre 500m e 900m, observadas temperaturas médias anuais entre 18 e 23°C. Para o conilon,

foram indicadas para sequeiro ou irrigado, apenas as áreas com altitudes inferiores a 500 m e com temperaturas médias anuais entre 22 e 26°C.

Na Tabela 6 é possível observar os valores térmicos e hídricos recomendados para a cultura do café no estado do Espírito Santo, sendo importante destacar que os valores citados, estão próximos aos apresentados por MATIELLO (1991), com pequena variação de incremento na temperatura, além de serem as mesmas faixas de valores indicadas para o estado de Rondônia.

Tabela 6. Faixas consideradas aptas referentes às características térmica e hídrica para a cultura do café, observadas para as espécies conilon (*coffea canephora*), e arábica (*coffea arabica*), para o Espírito Santo, segundo Brasil (2011).

Referências	Temperatura		Deficiência Hídrica	
	<i>Coffea canephora</i>	<i>Coffea arabica</i>	<i>Coffea canephora</i>	<i>Coffea arabica</i>
Faixas indicadas	22 a 26,0 °C	18,0 a 23 °C	< 200 mm	< 150 mm

Fonte: adaptada de Brasil (2011).

Entretanto, no tocante à recomendação da portaria 79/2011, também é fator indicativo relevante às áreas de plantio, a temperatura para o mês de novembro, considerando-se especificamente valores menores que 24°C para o arábica e menores que 25°C para o conilon no referido mês.

É importante destacar que as faixas indicadas na Tabela 6 estão em pleno acordo com os valores apresentados pela Portaria, n.º 80, de 25 de fevereiro de 2011, publicada no Diário Oficial da República Federativa do Brasil, nº 41, página 13, Seção 1, de 28 fevereiro de 2011, referente ao zoneamento agrícola para a cultura de café no Estado de Minas Gerais, sendo neste caso, exatamente os mesmos valores para os dois estados, seja para temperatura ou deficiência hídrica, tanto para o arábica quanto para o conilon.

Já Matiello et al., (2002) e Santinato et al. (2008), determinaram os valores das faixas de aptidão para a cultura do café referente às espécies conilon (*coffea canephora*) e arábica (*coffea arabica*) especificando intervalos de aptidões térmica e hídrica conforme observados por meio da Tabela 7 e Tabela 8.

Tabela 7. Faixas de aptidão térmica para a cultura do café, observadas para as espécies conilon (*coffea canephora*), e arábica (*coffea arabica*), segundo Matiello et al. (2002).

Aptidão	Temperatura (°C)	
	<i>Coffea Canephora</i>	<i>Coffea arabica</i>
Apta	22 a 26 °C	19 a 22 °C
Restrita	21 a 22 °C	18 a 19 e 22 a 23 °C
Inapta	<21 °C	< 18 °C e > 23 °C

Fonte: Adaptada de Matiello et al., 2002.

Tabela 8. Faixas de aptidão hídrica para a cultura do café, observadas para as espécies conilon (*coffea canephora*), e arábica (*coffea arabica*), segundo Matiello et al. (2002) e Santinato et al. (2008).

Aptidão	Deficiência Hídrica (mm)	
	<i>Coffea Canephora</i>	<i>Coffea arabica</i>
Apta sem irrigação	<150 mm	<100 mm
Apta com irrigação ocasional	150-200 mm	100-150 mm
Apta com irrigação complementar	200-400 mm	150-200 mm
Apta com irrigação obrigatória	>400 mm	>200 mm

Fonte: Adaptada de Matiello et al., 2002 e Santinato et al. , 2008.

O zoneamento climático é de grande importância na implantação e no planejamento de atividades agrícolas, visto que o estabelecimento de regiões climáticas favoráveis pode indicar as potencialidades do meio físico e biológico em estudo referentes aos recursos naturais nelas existentes. Entretanto, para a realização do zoneamento do café, são necessárias informações relativas à deficiência hídrica, obtidas por meio do balanço hídrico climatológico (BHC), que são posteriormente espacializadas utilizando-se normalmente dos sistemas de informações geográficas (SIG). Tais sistemas auxiliam nos mais diversos âmbitos a análise e manipulação de múltiplos tipos de dados e suas localizações, potencializando assim, as possibilidades de acerto em tomadas de decisões que envolvam dados distribuídos geograficamente.

2.3 Fenologia do café

Segundo MEIRELES (2009), durante todas as fases fenológicas do cafeeiro, o clima exerce grande influência sobre a produtividade da cultura e a qualidade da bebida. Adversidades climáticas relacionadas a deficiência hídrica e

valores extremos de temperatura do ar, podem resultar em redução na produtividade do cafeeiro, dependendo da duração, da intensidade e do estágio fenológico da planta no momento observado. Assim, o monitoramento agroclimático da cultura é um recurso precioso para avaliar como esses fatores interferem diretamente na fenologia das culturas, oferecendo suporte a tomadores de decisão e, proporcionando juntamente com informações de séries temporais agrometeorológicas em determinadas regiões, as informações sobre os períodos com excedentes e deficiências hídricas, além das condições termopluiométricas ao longo do ano, possibilitando assim, avaliar suas relações com as fases fenológicas da cultura e interferir em situações adversas ou otimizar a produção.

A primeira fase (vegetação e formação das gemas vegetativas), ocorre normalmente de setembro a março, e é caracterizada por dias longos e fotoperíodo de 13 a 14 horas de luz efetiva. Já, a segunda fase (indução, diferenciação, crescimento e dormência das gemas florais), é caracterizada por dias curtos, indo normalmente de abril a agosto. A terceira fase (florada), ocorre entre setembro e dezembro, iniciando-se após aumento do potencial hídrico nas gemas florais maduras (choque hídrico), até a “expansão dos frutos”. A florada principal acontece quando se verifica um período de restrição hídrica seguido de precipitação. Temperatura ambiente elevada associada a um intenso déficit hídrico durante o início da florada causa o abortamento das flores e estiagem forte poderá prejudicar o crescimento dos frutos. A quarta fase (granação), ocorre de janeiro a março do ano seguinte, quando há formação dos grãos, e nessa fase, um estresse hídrico pode ser prejudicial, resultando em frutos mal granados. A quinta fase é a de “maturação dos frutos”, que se verifica normalmente de abril a junho. Nessa etapa, deficiências hídricas moderadas beneficiam a qualidade do produto. Concluindo, a sexta fase (repouso e senescência), que ocorre entre julho e agosto, é caracterizada pela autopoda do cafeeiro, em que muitos ramos produtivos (terciários e quaternários) secam e morrem, limitando o crescimento vegetativo (MEIRELES, 2009).

2.4 Balanço hídrico

O balanço hídrico, segundo SENTELHAS (2012b), é o cômputo das entradas e saídas de água de um sistema. Em uma escala macro, o “balanço hídrico” constitui-se como o próprio “ciclo hidrológico”, cujo resultado fornecerá a água disponível na biosfera. Em uma escala intermediária representada por uma microbacia hidrográfica, este resulta na vazão de água do sistema e quando a chuva é menor que a demanda atmosférica por vapor d'água a saída desta diminui, o que ocorre de modo inverso em períodos de chuva, aumentando, portanto a vazão. Já em uma escala local de cultura, o balanço hídrico estabelece a relação de armazenamento/disponibilidade de água no solo. Portanto, sabendo-se as características do solo, pode-se identificar a capacidade de armazenamento e a quantidade de água disponível, possibilitando assim, determinar se a cultura está ou não sofrendo deficiência hídrica, o que implica diretamente no rendimento da lavoura. As principais entradas para o balanço hídrico climatológico são a precipitação, o orvalho, o escoamento superficial, o escoamento subsuperficial e a ascensão capilar. Já as principais saídas são a evapotranspiração, a drenagem profunda, o escoamento superficial e o escoamento subsuperficial. A partir destes elementos, é possível equacionar as entradas e saídas de água do sistema, obtendo a variação de armazenamento de água no solo, dada por ΔARM . O processo de variação de disponibilidade de água e os componentes hídricos envolvidos podem ser observados por meio da Figura 1.

Observando-se o grau de importância dos elementos supracitados, nota-se que a chuva (precipitação) é o principal componente de entrada e reposição de água neste sistema. Segundo SENTELHAS (2012b), também é necessário observar, que a contribuição do orvalho somente assumirá papel importante em regiões muito áridas e que as entradas de água pela ascensão capilar também são muito pequenas, somente ocorrendo em locais com lençol freático superficial e em períodos muito secos, sendo, portanto as contribuições destas variáveis para a maioria dos casos consideradas desprezíveis. Já os fluxos horizontais de água para escoamento superficial de entrada e o escoamento superficial de saída se anulam em áreas homogêneas, o que também ocorre para o escoamento subsuperficial de entrada e o escoamento subsuperficial de saída,

sendo, portanto variáveis que se compensam. Assim, pode-se considerar que a precipitação é a principal entrada de água do sistema, a evapotranspiração sendo a principal saída especialmente em períodos secos, e que a drenagem profunda é a principal saída em períodos excessivamente chuvosos, o que possibilita a simplificação da equação de ΔARM , observada na Figura 1.

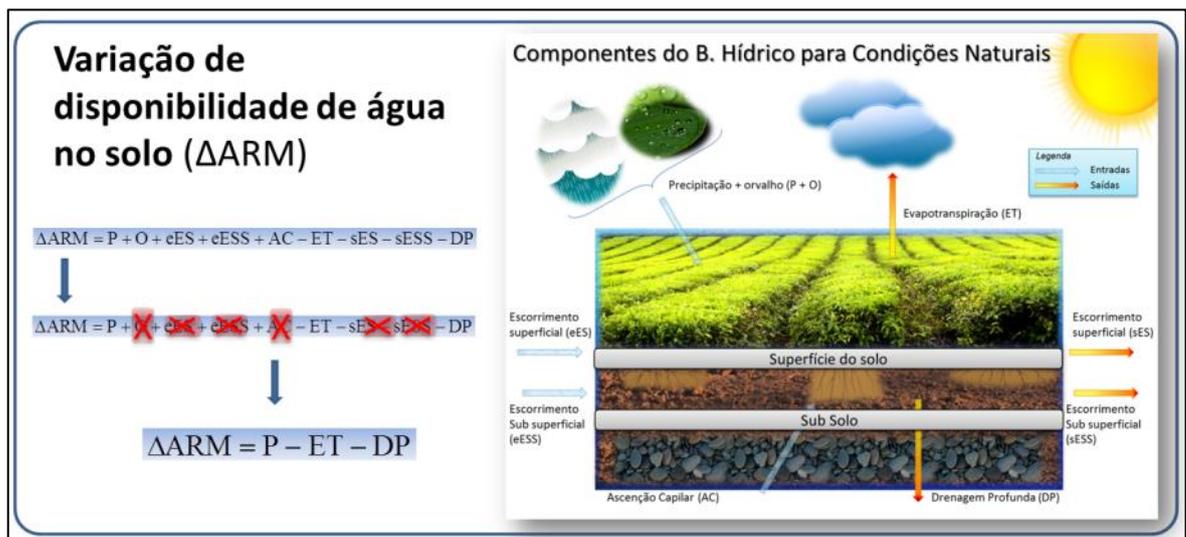


Figura 1. Componentes do balanço hídrico para condições naturais

Neste trabalho fora utilizado para o cálculo do balanço hídrico normal climatológico o método desenvolvido por Thornthwaite & Mather (1955), que utiliza como base, parâmetros de fácil obtenção, destacando-se a temperatura mensal, a precipitação e a latitude do local (φ), que com base nos processos resultantes da metodologia aplicada possibilitaram a obtenção dos valores para evapotranspiração potencial (ETP), capacidade de água disponível (CAD), armazenamento de água no solo (ARM), evapotranspiração real (ETR), deficiência hídrica (DEF) e excedente hídrico (EXC). O método supracitado será melhor detalhado durante o processamento dos mapas necessários ao desenvolvimento do trabalho.

2.5 Sistemas de informações geográficas (SIG)

É necessário ressaltar que os sistemas de informações geográficas têm contribuído de forma imensurável, para análise dos mais diversos cenários atuais, e possivelmente continuarão contribuindo com o aumento das pesquisas de forma abrangente e consistente, estejam elas relacionadas ao meio ambiente, à gestão de cidades, ao uso e à ocupação do solo, ao cadastro urbano e rural, às informações espaciais de dados cartográficos, aos dados censitários, às imagens de satélite ou diversas outras situações.

Segundo CAMARA et al. (2004):

“Se onde é importante para seu negócio, então Geoprocessamento é sua ferramenta de trabalho. Sempre que o onde aparece, dentre as questões e os problemas que precisam ser resolvidos por um sistema informatizado, haverá uma oportunidade para considerar a adoção de um SIG”.

Os SIGs (Figura 2), são sistemas que comportam informações, e estão organizados de forma a prover uma gama de ferramentas que conjuntamente auxiliem no cadastro, na atualização, na visualização, no processamento, na edição e consulta de informações, com o principal objetivo de auxiliar na tomada de decisões sobre as mais diversas situações relacionadas ao meio (BRAGA, 2011). Nos SIGs, os dados georreferenciados são representados na forma gráfica (pontos, linhas, polígonos e pixels), e alfanumérica (letras e números), de modo a exporem, descreverem e detalharem a localização de um dado fenômeno geográfico relacionado a uma determinada posição sob ou sobre a superfície terrestre.

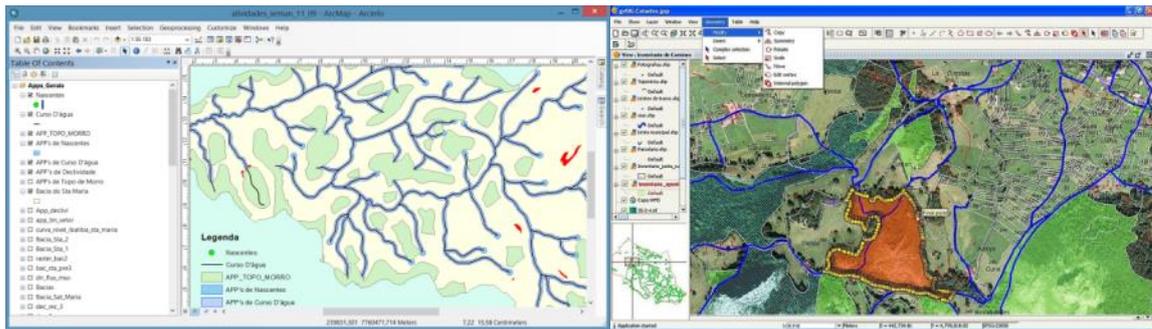


Figura 2. ArcGIS e GvSIG – Exemplos de Sistemas de Informações Geográficas.

Um SIG é um sistema que tem por finalidade automatizar tarefas que seriam realizadas manualmente, de modo a possibilitar análises complexas por meio da integração de dados geocodificados, tendo como características principais as capacidades de coleta, armazenamento e recuperação de informações de formatos distintos (SANTOS, 1999, Apud FELGUEIRAS 1987). Dentre os elementos/formatos utilizados para representação de dados, pode-se destacar os formatos vetoriais e *raster*, além das tabelas de dados que armazenam informações correlacionadas às coordenadas geográficas utilizadas, bem como, a possibilidade de utilização de múltiplas camadas de informações sobrepostas de forma a caracterizar, manipular informações e descrever as áreas analisadas (ESRI, 2010). Na Figura 3 pode-se observar algumas possibilidades de representação em um ambiente SIG. por meio de imagens do tipo *raster*, e relacionamento entre elementos vetoriais (como pontos, linhas e polígonos) com informações descritivas sobre situações em estudo.

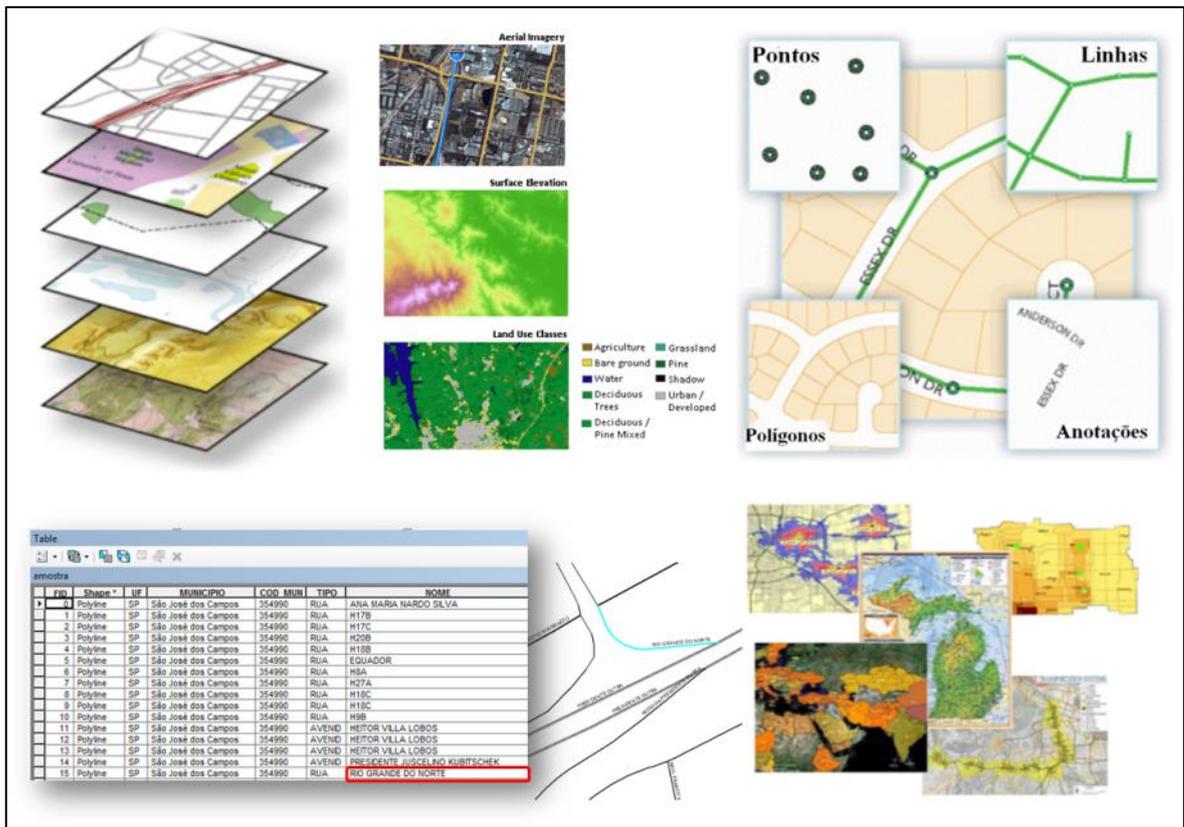


Figura 3. Sistemas de Informações Geográficas, suas possibilidades de representação, organização e armazenamento de informações (Adaptada de ESRI,2010).

Ainda segundo ESRI (2012), um SIG é um sistema usado para descrever e caracterizar a terra e sua geografia com propósito de visualizar e analisar informação geográfica referenciada, integrando o conhecimento proveniente de múltiplas fontes e criando um ambiente para colaboração que combine o poder da visualização de mapas e as possibilidades de análises complexas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado a partir da obtenção de dados provenientes de estações climáticas, radares e mapas de feições relativos à área da bacia hidrográfica do rio Itapemirim, que resultaram na elaboração dos mapas mensais (janeiro a dezembro), referentes aos parâmetros de temperatura, precipitação, evapotranspiração potencial (ETP), precipitação menos evapotranspiração potencial (P-ETP), negativo acumulado (NAC), armazenamento (ARM), alteração (ALT), evapotranspiração real (ETR), deficiência hídrica (DEF) e excedente hídrico (EXC), derivados do processamento pixel a pixel dos cálculos do balanço hídrico climatológico para a área de estudo.

Para tanto, foram desenvolvidos diversos algoritmos computacionais que realizaram o processamento dos dados obtidos, de forma a executarem os procedimentos pontuais (pixel a pixel) para todas as etapas do método supracitado. Após o processamento, parte dos mapas resultantes foi utilizada como dados de entrada para aprofundamento no estudo de diversas variáveis e sua relação com as áreas de ocorrência do café na bacia hidrográfica do rio Itapemirim. O mapa de localização do café foi obtido por meio dos procedimentos de fotointerpretações desta cultura no estado do Espírito Santo realizados por BRAGANÇA (2012). Após as devidas conversões, e considerando-se os pontos de localização do café na área de estudo, os dados desta cultura foram correlacionados fidedignamente a cada ponto de ocorrência de temperatura,

deficiência hídrica e altitude, possibilitando as análises pertinentes ao estudo proposto.

3.1 Área de estudo

A área de estudo compreende o rio Itapemirim, que nasce no Parque Nacional do Caparaó e abrange os municípios de Alegre, Atilio Vivacqua, Castelo, Conceição do Castelo, Cachoeiro de Itapemirim, Jerônimo Monteiro, Muniz Freire, Venda Nova do Imigrante, Ibitirama, Ibatiba, Itapemirim, Irupi, Iúna, Marataízes, Muqui, Presidente Kennedy e Vargem Alta. Os seus principais afluentes são os rios Castelo, Muqui do Norte, Braço Norte Direito, Braço Norte Esquerdo, Pardo, São João de Viçosa, Caxixe, Prata, Alegre, Pardinho, Monte Alverne, Pedra Roxa e Pedregulho. No tocante ao uso do solo, a área abrange a agropecuária, a mineração de mármore e granito e as indústrias de açúcar e álcool (AEES, 2008). A área de estudos pode ser observada por meio da Figura 4.

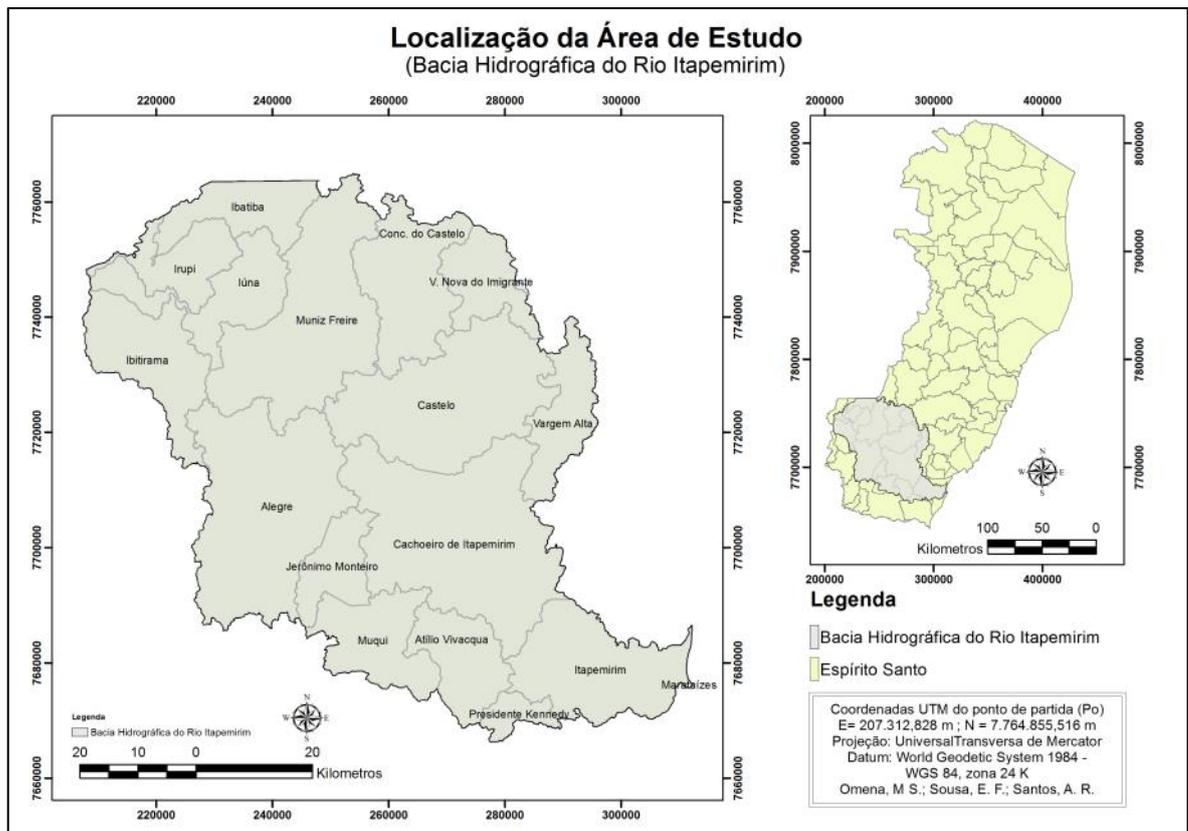


Figura 4. Localização da área de estudo

Ainda, de acordo com Almeida et al. (2011) e IJSN (2009), a bacia hidrográfica do rio Itapemirim está localizada na região sul do Espírito Santo, com área total de aproximadamente 5.923 km², abrangendo 17 municípios, geograficamente situada entre os meridianos -40°48' e -41°52' e entre os paralelos -20°10' e -21°15'. Segundo a classificação de Köppen, o clima se enquadra como Cwa, com inverno seco e verão chuvoso.

3.2 Mapas de informações base

Para espacialização da precipitação e temperatura, foram utilizadas como base, as médias mensais referentes ao período de 30 anos (1977 a 2006), obtidas por meio do sistema de informações hidrológicas (HidroWEB) da Agência Nacional de Águas (ANA), INMET e INCAPER, derivadas dos trabalhos de Castro (2008). A Figura 5 possibilita vislumbrar a distribuição das 36 estações meteorológicas utilizadas neste trabalho (32 estações no estado do Espírito Santo, 3 em Minas Gerais e 1 no Rio de Janeiro).

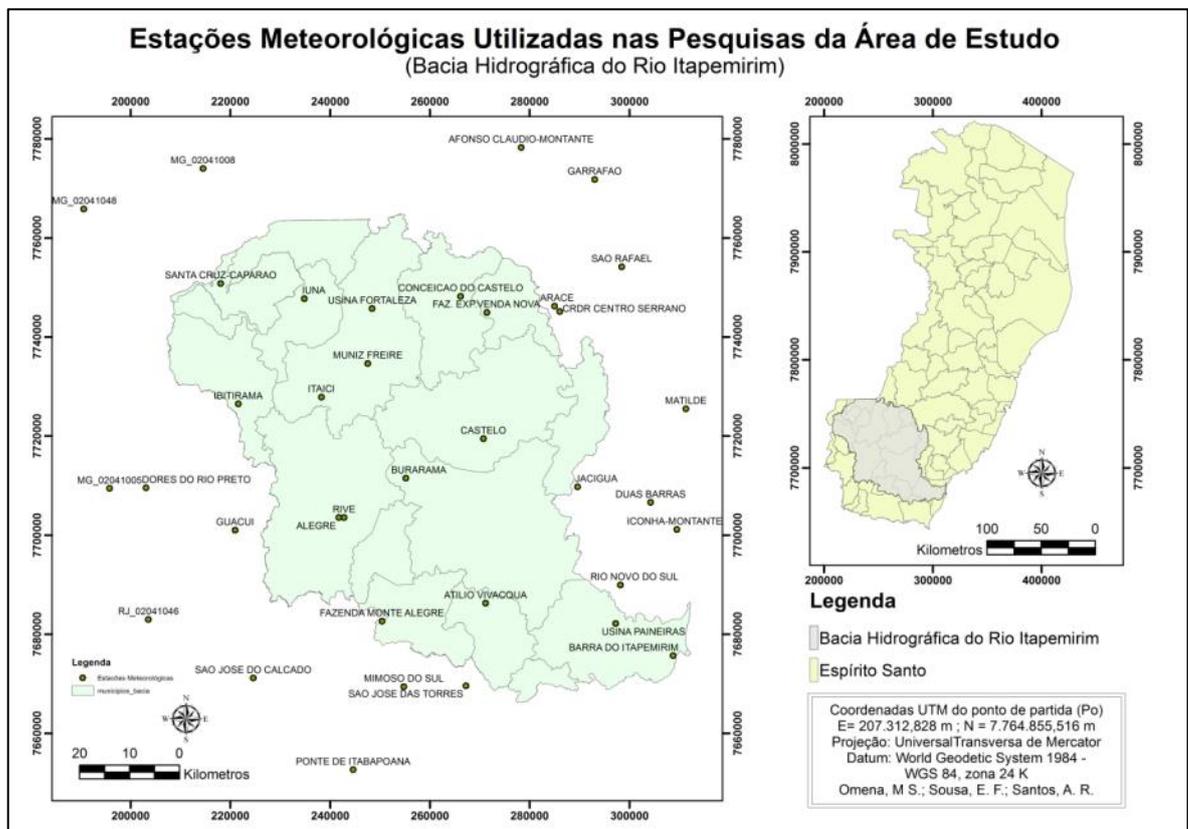


Figura 5. Estações Meteorológicas de onde foram obtidos os dados base utilizados para as análises realizadas na bacia hidrográfica do rio Itapemirim.

Por meio da opção “Add XY Data” do ArcGIS 10, foram inseridos os pontos referentes às estações meteorológicas e os respectivos valores da série histórica concernentes aos dados mensais de temperatura média (C^o) e precipitação (mm), além das informações de altitude, longitude e latitude relativas a cada uma das estações que conglomeram a área de estudo. Os mapas foram gerados observando-se todos os meses do ano, utilizando-se para isso os valores médios mensais da temperatura e precipitação supracitados.

Para geração do mapa de altitude, foram utilizados os dados SRTM disponibilizados por meio da EMBRAPA e MIRANDA (2005), relativos às folhas SF-24-V-A e SF-24-V-C, que possuem resolução espacial de 90 metros, abrangendo por completo a bacia hidrográfica do rio Itapemirim apresentadas na Figura 6.

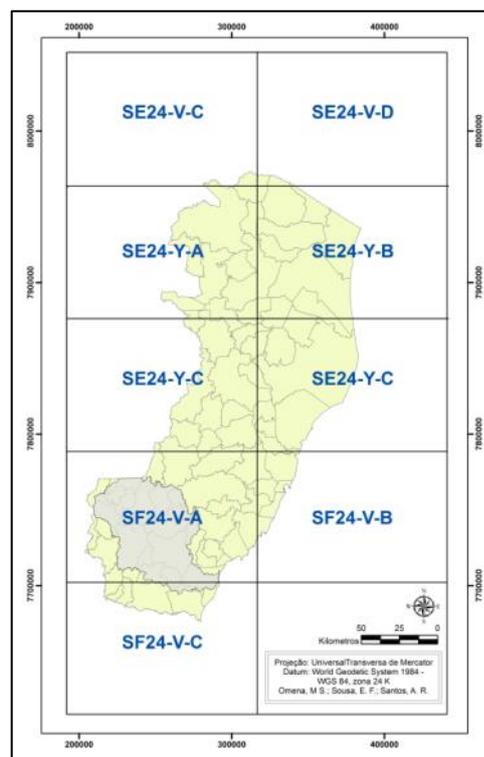
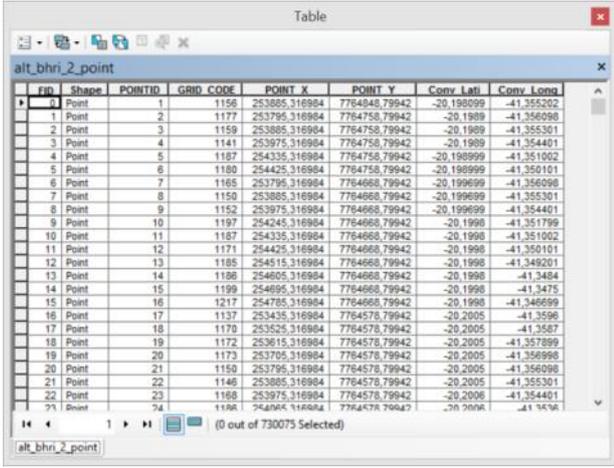


Figura 6. Destaque das folhas SRTM 1:250.000 em sistema de coordenadas geográficas e Datum WGS84 para o Estado do Espírito Santo, utilizadas neste trabalho. Fonte: adaptado da EMBRAPA e Miranda (2005).

Após a obtenção dos dados, foi realizado o procedimento de mosaicagem das folhas SF-24-V-A e SF-24-V-C e processado o recorte para a área de estudo

com base no *shape* da bacia hidrográfica do rio Itapemirim, utilizando-se da ferramenta “*Extract by Mask*” do ArcGIS 10.

No processo de espacialização dos mapas de longitude e latitude, o mapa de altitude foi convertido do tipo *raster* para o tipo *shape* de pontos por meio da ferramenta “*Raster To Point*” do ArcGIS 10, resultando assim, em uma malha de valores pontuais permeando toda a área de estudo, a qual foi posteriormente aplicada a ferramenta “*Add XY Coordinates*” que adiciona os campos POINT_X (referentes a longitude), e POINT_Y (referentes a latitude) na tabela de dados dos resultados com os valores calculados em UTM (metros) para cada um dos pontos existentes. Em posse destes dados foi utilizado o módulo “*LatLongUTMconversion*” e mais especificamente a função “*UTMtoLL*” de Gantz & Nelson (2012), disponível para a linguagem Python, visando realizar a conversão dos dados de UTM para Lat/Long. Tal procedimento, simultaneamente com os algoritmos desenvolvidos nesse trabalho, possibilitaram a adição de dois novos campos ao *shape* de pontos de altitude denominados Conv_Lati e Conv_Long, com os dados já devidamente convertidos para cada ponto/pixel conforme Figura 7. Com a posse dos dados obtidos, foram gerados por meio da ferramenta “*Point To Raster*” do ArcGIS 10, os mapas de latitude e longitude.



ID	Shape	POINTID	GRID_CODE	POINT_X	POINT_Y	Conv_Lati	Conv_Long
1	Point	1	1156	253885,316984	776458,79942	-20,19899	-41,355202
2	Point	2	1177	253795,316984	7764758,79942	-20,1989	-41,356098
3	Point	3	1159	253885,316984	7764758,79942	-20,1989	-41,355301
4	Point	4	1141	253975,316984	7764758,79942	-20,1989	-41,354401
5	Point	5	1187	254335,316984	7764758,79942	-20,198999	-41,351602
6	Point	6	1180	254425,316984	7764758,79942	-20,198999	-41,350101
7	Point	7	1185	253795,316984	7764668,79942	-20,199699	-41,356098
8	Point	8	1150	253885,316984	7764668,79942	-20,199699	-41,355301
9	Point	9	1152	253975,316984	7764668,79942	-20,199699	-41,354401
10	Point	10	1197	254245,316984	7764668,79942	-20,1998	-41,351799
11	Point	11	1187	254335,316984	7764668,79942	-20,1998	-41,351602
12	Point	12	1171	254425,316984	7764668,79942	-20,1998	-41,350101
13	Point	13	1185	254515,316984	7764668,79942	-20,1998	-41,349201
14	Point	14	1186	254605,316984	7764668,79942	-20,1998	-41,3484
15	Point	15	1199	254695,316984	7764668,79942	-20,1998	-41,3475
16	Point	16	1217	254785,316984	7764668,79942	-20,1998	-41,346699
17	Point	17	1137	253435,316984	7764578,79942	-20,2005	-41,3598
18	Point	18	1170	253525,316984	7764578,79942	-20,2005	-41,3587
19	Point	19	1172	253615,316984	7764578,79942	-20,2005	-41,357899
20	Point	20	1173	253705,316984	7764578,79942	-20,2005	-41,356998
21	Point	21	1150	253795,316984	7764578,79942	-20,2005	-41,356098
22	Point	22	1146	253885,316984	7764578,79942	-20,2005	-41,355301
23	Point	23	1188	253975,316984	7764578,79942	-20,2005	-41,354401
24	Point	24	1186	254065,316984	7764578,79942	-20,2005	-41,353501

Figura 7. Tabela de campos e dados resultantes do processo de conversão de UTM para Lat/Long por meio do módulo LatLongUTMconversion do Python em conjunto com os algoritmos desenvolvidos.

Com base nos valores de temperatura para cada estação da área de estudo, juntamente com as informações de altitude, longitude e latitude, foram elaboradas (com base nos dados mensais), as equações de regressão linear múltipla, que posteriormente, foram utilizadas para determinar o valor de temperatura para cada pixel na área de estudo. O modelo geral de formação das equações de regressão é apresentado na equação 1 e os coeficientes mensais para formação das equações de regressão são apresentados na Tabela 9.

$$T = \beta_0 + \beta_1 * Alt + \beta_2 * PX + \beta_3 * PY + \varepsilon_i \quad (1)$$

Onde:

T= Temperatura (C°);

Alt = Altitude de cada pixel obtida por meio do MDE (metros);

PX = Valor de longitude correspondente a cada pixel (UTM);

PY = Valor de latitude correspondente a cada pixel (UTM);

β_0 = Constante da regressão;

β_1 ; β_2 ; β_3 = Coeficientes da regressão;

ε_i = erro aleatório;

R^2 = coeficiente de determinação variando de 0 a 1; onde quanto mais próximo de 1 (um) for o resultado, melhor a variável dependente pode ser explicada.

Determinadas as equações de regressão mensais, foi utilizada a ferramenta “*Raster Calculator*” do ArcGIS 10, para gerar os *rasters* de temperaturas, considerando-se pixel a pixel os mapas de longitude, latitude e altitude obtidos para a área de estudo como parâmetros da referida equação.

Para espacialização da precipitação, foram utilizadas as médias mensais referentes ao período de 30 anos (1977 a 2006), que conjuntamente com as técnicas de Krigagem Esférica, Krigagem Linear e Krigagem Exponencial (observando-se nestes casos, a técnica no qual foram obtidos os melhores

resultados para cada mês no estado do Espírito Santo), recomendadas por SILVA (2010), resultaram nos mapas mensais (janeiro a dezembro), relativos aos dados de precipitação. Os resultados foram obtidos utilizando-se a ferramenta *Kriging* do ArcGIS 10 configurado com pixel de saída para 90 metros de resolução espacial.

Tabela 9. Coeficientes mensais para as regressões lineares múltiplas de temperatura média do ar na bacia hidrográfica do rio Itapemirim.

Mes	B ₀	B ₁	B ₂	β ₃	R ²
Janeiro	8.957123	-0.006584	-0.362870	-0.204635	0.9713
Fevereiro	10.949383	-0.006873	0.322167	-0.211858	0.9723
Março	33.052191	-0.006549	0.063461	0.135016	0.9876
Abril	16.610361	-0.006813	-0.325340	0.181970	0.9717
Mai	39.590507	-0.007151	0.352409	0.022441	0.9823
Junho	92.180463	-0.008395	1.028636	1.272058	0.8277
Julho	72.164197	-0.007997	0.787295	0.811127	0.8999
Agosto	6.415874	-0.007748	-0.373699	-0.096445	0.9770
Setembro	-10.147977	-0.006977	-1.045016	0.420550	0.9815
Outubro	-8.931982	-0.006652	-0.994458	0.313678	0.9693
Novembro	0.983212	-0.006284	-0.705343	0.183794	0.9631
Dezembro	12.923012	-0.006164	-0.342342	-0.000529	0.9592

Para realização do balanço hídrico também fora utilizada a nova classificação da carta de classes de solos produzida pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2011), que apontou as classes de Latossolo Vermelho-Amarelo, Nitossolo Vermelho, Chernossolo Argilúvico, Cambissolo Háplico, Afloramento de Rochas, Argissolo Vermelho-Amarelo, Neossolo Litólico, Neossolo Flúvico, Água, Gleissol Melânico, Neossolo Quartzarênico e Gleissolo Sáfico, como tipos presentes na área da bacia hidrográfica do rio Itapemirim. Ainda de acordo com MATIELLO (1991), dois fatores principais devem ser observados com relação ao solo: a profundidade deste e a sua capacidade de armazenar água. O cafeeiro necessita pelo menos de 1,2 m de profundidade de solo em boas condições de textura e estrutura, para que possa manter um sistema radicular eficiente. O solo para o cafeeiro deve apresentar uma boa porosidade, permitindo maior armazenamento de água e ar. SANTOS (1999) apud RENA et al (1986), acrescenta que o solo ideal deve possuir uma textura média a argilosa, não devendo conter mais de 15% de pedras e cascalhos, além

de possuir uma estrutura granular ou subgranular média e boa estabilidade dos agregados em água.

Na posse dos dados de solo, foram realizados os cálculos dos valores de CAD, e nesse contexto foram adotados os métodos utilizados por SILVA (2010), que estão em conformidade com DOORENBOS & KASSAM (1994), que assumem valores gerais em milímetros para as três principais texturas de solos, sendo assim classificadas como pesada (solo argiloso), média (solo franco), e grossa (solo arenoso), respectivamente relacionadas a 200, 140 e 60 mm/m. Já com relação à profundidade efetiva das raízes do cafeeiro, neste trabalho, foram consideradas as características conforme observadas por MATIELLO et al. (2005), que identificaram-na como sendo de 0,85 metros.

A classificação de textura dos solos da bacia hidrográfica do rio Itapemirim pode ser observada por meio da Tabela 10.

Tabela 10. Tipos de textura dos solos observados por meio da classificação da EMBRAPA para a bacia hidrográfica do rio Itapemirim

Tipo de Solo	Textura
Latossolo Vermelho-Amarelo	Pesada
Nitossolo Vermelho	Pesada
Chernossolo Argilúvico	Média
Cambissolo Háptico	Média
Afloramento de Rochas	-
Argissolo Vermelho-Amarelo	Média
Neossolo Litólico	Média
Neossolo Flúvico	Média
Água	-
Gleissol Melânico	Pesada
Neossolo Quartzarênico	Grossa
Gleissolo Sáfico	Pesada

A partir da obtenção dos dados referentes aos tipos de solos, utilizou-se para determinação da CAD, a Equação 2, que possui como variáveis a água total disponível no solo (D), e a profundidade efetiva do sistema radicular (Z), das plantas sob cultivo.

$$CAD=D*Z \quad (2)$$

Onde:

D= água total disponível no solo (mm/m);

Z= profundidade efetiva do sistema radicular (m).

Para obtenção dos pontos de ocorrência do café foram selecionadas as feições resultantes da fotointerpretação desta cultura, obtidas por meio dos trabalhos de BRAGANÇA (2012), referentes aos municípios da área de estudo do escopo da pesquisa, vislumbrando a realização dos procedimentos necessários a criação do mapa de distribuição do café em toda área examinada. Os *shapes*/feições foram processados de modo a formarem um único arquivo relativo à área de estudo, de modo que possibilitasse a obtenção dos pontos de ocorrência do café para a área em análise.

Este processo foi realizado por meio da opção “*Union*” disponível no “*ArcToolbox Window*”, que permitiu realizar a união de todo conjunto de dados em um único *shape* que contemplou inteiramente área de análise desta pesquisa. Feito isto, fora utilizada a opção “*Clip*” para realizar um recorte exato com base na bacia hidrográfica do rio Itapemirim, resultando somente em informações inclusas na área averiguada. Por fim, os dados foram transformados de polígono para *raster* por meio da ferramenta “*Polygon To Raster*”, resultando no mapa pretendido.

3.3 Mapas resultantes do balanço hídrico normal climatológico

Segundo SENTELHAS (1999), tendo como base CAMARGO (1971), e PEREIRA et al. (1997), o balanço hídrico climatológico é uma das maneiras de se monitorar a variação da água armazenada no solo contabilizando o suprimento natural desta por meio da precipitação (P), e também da demanda atmosférica (ETP), estando diretamente relacionadas à capacidade de água disponível (CAD) em questão, possibilitando assim, obter as estimativas de armazenamento de água no solo (ARM), evapotranspiração real (ETR), deficiência hídrica (DEF) e excedente hídrico (EXC).

Para realização dos procedimentos necessários a obtenção do balanço hídrico normal climatológico, adaptou-se a metodologia de cálculo para um único ponto descrito por SENTELHAS e ANGELOCCI (2012b), desenvolvendo rotinas computacionais que em conjunto com a biblioteca Arcpy do ArcGIS 10, possibilitaram a obtenção dos resultados pixel a pixel para toda a área em estudo. Para implementação do processo mencionado, procedeu-se com a geração pixel por pixel dos mapas demandados da seguinte forma:

- a) Desenvolvimento dos procedimentos em linguagem computacional necessários a realização dos cálculos para obtenção dos mapas de evapotranspiração potencial (ETP);
- b) Desenvolvimento das rotinas de cálculo entre os mapas de precipitação (P) e evapotranspiração potencial (ETP);
- c) Desenvolvimento das rotinas de cálculo para elaboração dos mapas de negativo acumulado (NEG.ACUM) e armazenamento de água no solo (ARM) de modo conjunto;
- d) Desenvolvimento das rotinas de cálculo para elaboração dos mapas de alteração (ALT);
- e) Desenvolvimento das rotinas de cálculo para elaboração dos mapas de evapotranspiração real (ETR);
- f) Desenvolvimento das rotinas de cálculo para elaboração dos mapas de deficiência hídrica (DEF);
- g) Desenvolvimento das rotinas de cálculo para elaboração dos mapas de excedente hídrico (EXC);
- h) Desenvolvimento das rotinas de cálculo para elaboração do mapa do déficit de evapotranspiração relativa (DER).

A ETP representa a perda potencial de água por uma extensa superfície vegetada com grama, em crescimento ativo e sem falta de água. Os valores para a evapotranspiração potencial mensal foram calculados para todos os pixels da área de estudo utilizando-se do método desenvolvido por THORNTHWAITE

(1955) e recomendados por SENTELHAS & ANGELOCCI (2012a), FILHO et. al (2011), SILVA (2010) e SILVA (2005). Os resultados foram processados por meio das equações 3 a 9:

$$ETP = 16 * \left(\frac{10 * Temp}{I} \right)^a * COR \quad \text{para : } 0 \leq Temp < 26,5 \quad (3)$$

$$ETP = (-415,85 + 32,24 * Temp - 0,43 * Temp^2) * COR \quad \text{para : } Temp \geq 26,5 \quad (4)$$

$$I = \sum_{n=1}^{12} (0,2 * Temp)^{1,514} \quad (5)$$

$$a = 6,75 * 10^{-7} * I^3 - 7,71 * 10^{-5} * I^2 + 1,7912 * 10^{-2} * I + 0,49239 \quad (6)$$

$$hn = \arccos[-\tan \varphi \tan \delta] \quad (7)$$

$$N = \frac{2 * hn}{15} \quad (8)$$

$$COR = \left(\frac{ND}{30} \right) * \left(\frac{N}{12} \right) \quad (9)$$

Onde:

Temp= temperatura média do mês em graus celsius (C°);

I = índice que expressa o nível de calor disponível no local;

a = índice térmico local;

ND = número dia do ano;

φ = latitude do local;

hn = ângulo horário do nascer do sol;

δ = declinação solar;

N = fotoperíodo (horas);

COR = fator de correção da evapotranspiração.

Assim, obtidos os mapas de temperatura, foram processados os cálculos mensais por meio do processo decisório com base na temperatura (equação 3 ou 4), e demais equações necessárias (5, 6,7, 8 e 9), resultando nos mapas de ETP, obtidos, para cada ponto/pixel referente ao mês em análise.

Para realização dos cálculos (pixel a pixel) entre os mapas de precipitação (P) e evapotranspiração potencial (ETP) foi utilizada a Equação 10.

$$P - ETP = (P) - (ETP) \quad (10)$$

É importante salientar que os resultados positivos para P-ETP indicam chuva em excesso, sendo, portanto os resultados negativos representativos de perda potencial de água nos meses analisados, indicando nesses casos, meses secos e solo com armazenamento restrito de água.

Para realização dos cálculos (pixel a pixel) do somatório das sequências de valores negativos de P-ETP, resultando no negativo acumulado (NAC), em conjunto com os cálculos para armazenamento de água no solo (ARM), fez-se necessária a geração/processamento destes dois mapas de modo simultâneo, visto que as colunas de NEG.ACUM e ARM devem ser preenchidas simultaneamente durante a elaboração do balanço hídrico climatológico com base em um único ponto, conforme a descrição dos procedimentos para realização dos cálculos necessários a conclusão que esta etapa exige.

O procedimento tem início com a verificação dos valores pixel a pixel de cada mapa mensal do parâmetro P-ETP, de forma a identificar qual o primeiro mês em que aparecerá um determinado valor negativo para P-ETP, considerando-se ainda um período anterior de valores positivos necessários ao abastecimento do solo com água. Identificado este primeiro mês, o NEG.ACUM será igual a P-ETP, e em posse do valor obtido neste processo, calcula-se o pixel resultante para o mapa de ARM no referido mês por meio da Equação 11.

$$ARM = CAD * EXP \left[\frac{NEG.ACUM}{CAD} \right] \quad (11)$$

Seguindo o processo, caso o próximo mês também apresente um valor negativo para P-ETP, deve-se acumular o valor com o correspondente pixel do mês anterior e utilizar-se desse resultado para o cálculo do Mapa de ARM, continuando este ciclo enquanto P-ETP for negativo.

Na ocorrência de um mês com P-ETP positivo, após uma sequência de P-ETP negativos, soma-se o valor positivo de P-ETP ao ARM do mês anterior, obtendo-se o ARM do pixel no mês em questão (que não deverá ultrapassar o valor da CAD do referido pixel), e a partir deste valor em ARM para o pixel/mês vigente, obtém-se o NEG.ACUM do mesmo mês por meio da equação 12:

$$\text{NEG.ACUM.} = \text{CAD} * \text{Ln} \left[\frac{\text{ARM}}{\text{CAD}} \right] \quad (12)$$

Os mapas de alteração (ALT), expressam a reposição e retirada de água no solo, informando, portanto o fluxo de alterações que ocorrem durante os meses do ano. É importante observar que se o resultado da alteração for maior que 0 (zero) ocorreu reposição de água para o pixel/ponto em questão no referido mês, já, caso o valor da alteração em dado pixel seja menor que 0 (zero), conclui-se que houve retirada de água no ponto/pixel do mês em questão. Assim, os cálculos de alteração expressam o ΔARM (ou variação), da água disponível no solo. A alteração é obtida por meio dos valores de armazenamento de água no solo para o mês em questão, subtraído dos valores de armazenamento de água do solo obtidos para o mês anterior ao vigente. Os cálculos de alteração são expressos por meio da Equação 13.

$$\text{ALT} = \text{ARM} - \text{ARMa} \text{ (mês anterior)} \quad (13)$$

Segundo ABID (2014), a evapotranspiração real está intimamente ligada à evapotranspiração potencial. Assim, partindo-se do princípio de que a evapotranspiração potencial (ETP), ou máxima, é aquela que ocorre em uma condição na qual não existem fatores limitantes tanto na planta quanto no solo que venham impedir que a planta transpire em sua condição máxima, qualquer situação em que ocorram tais limitações, indicará uma circunstância de ocorrência da evapotranspiração real (ETR). Também é importante observar que a partir dos conceitos citados a ETR sempre será menor ou igual à ETP.

Para determinação da ETR duas situações devem ser observadas:

- a) Se P-ETP for menor que 0 (zero), procede-se de acordo com a Equação 14.

$$ETR = P + |ALT| \quad (14)$$

- b) Caso P-ETP seja maior ou igual a zero, procede-se de acordo com a equação 15.

$$ETR = ETP \quad (15)$$

A deficiência hídrica (DEF) é expressa pela relação verificada na Equação 16. Valores maiores para a deficiência hídrica possibilitam identificar o grau de intensidade na qual ocorreu um problema relativo à evapotranspiração potencial, ou seja, o que a cultura deveria ter evapotranspirado caso não houvesse restrição de água. Conseqüentemente, conclui-se que quanto mais próximo de zero, melhor o resultado obtido no tocante a este parâmetro. Portanto, a deficiência hídrica é expressa segundo SENDELHAS(2012b), como sendo o quanto o sistema solo-planta deixou de evapotranspirar.

$$DEF = ETP - ETR \quad (16)$$

O excedente hídrico está relacionado à água que não pode ser retida pelo solo e drena em profundidade (água gravitacional). Os cálculos de excedente hídrico são expressos em função de ARM e contemplam as seguintes situações:

- a) Se o armazenamento de água no solo (ARM) é menor do que a capacidade de armazenamento do solo (CAD), então excedente é igual a zero, utilizando-se a Equação 17.

$$EXC = 0 \quad (17)$$

- b) Se o armazenamento de água no solo (ARM) é igual à capacidade de armazenamento do solo (CAD) então ocorrerá excedente, e utiliza-se a Equação 18.

$$EXC = P - ETP - ALT \quad (18)$$

Segundo DOORENBOS & KASSAM (1994), o déficit de evapotranspiração relativa expressa a magnitude e duração do déficit hídrico, que está estreitamente correlacionado com o rendimento da cultura. Por meio da Equação 19, foi obtido o mapa de déficit de evapotranspiração relativa para a área de estudo.

$$DER = 1 - \frac{ETR(anual)}{ETP(anual)} \quad (19)$$

Onde:

DER = Déficit de evapotranspiração relativa;

ETR(anual) = Somatório da evapotranspiração real (jan-dez);

ETP(anual) = Somatório da evapotranspiração potencial (jan-dez).

3.4 Análises para a cultura do café na área de estudo

Diante dos resultados observados nos mapas obtidos por meio dos processos supracitados, e tendo por base o mapa de localização do café, foram correlacionados os pontos de ocorrência da referida cultura com os parâmetros de altitude, deficiência hídrica, déficit de evapotranspiração relativa e temperatura na bacia hidrográfica do rio Itapemirim.

Para execução do processo, foram desenvolvidos algoritmos que realizaram a correlação dos pontos de ocorrência do café com os locais exatos de ocorrência dos mesmos pontos para cada um dos parâmetros em estudo, associando-os de forma a permitir uma análise apurada e o contraste dos resultados.

O processo resultou nos mapas de temperatura, deficiência hídrica, déficit de evapotranspiração relativa e altitude com valores atribuídos apenas aos pontos onde ocorre o café na região estudada. Por fim, os mapas resultantes foram reclassificados com objetivo de analisar os intervalos/classes de maior significância nos pontos onde ocorre o plantio da cultura e contrastar os resultados obtidos com as faixas indicadas na literatura.

Como referência para os parâmetros analisados relativos às espécies conilon (*coffea canephora*) e arábica (*coffea arabica*) na literatura, foram consideradas as faixas de aptidão térmica e hídrica para a cultura do café, com base em MATIELLO (1991), MATIELLO et al. (2002) e SANTINATO et al. (2008), sendo para altitude considerados os valores observados por BRASIL (2011), conforme Tabela 11, Tabela 12 e Tabela 13.

Tabela 11: Faixas de aptidão térmica para a cultura do café, observadas para as espécies conilon (*coffea canephora*), e arábica (*coffea arabica*), segundo MATIELLO (1991) e MATIELLO et al. (2002).

Aptidão	Temperatura (°C)	
	<i>Coffea canephora</i>	<i>Coffea arabica</i>
Apta	22 a 26 °C	19 a 22 °C
Restrita	21 a 22 °C	18 a 19 e 22 a 23 °C
Inapta	<21 °C	< 18 °C e > 23 °C

Fonte: Adaptada de Matiello (1991) e Matiello et al. (2002).

Tabela 12: Faixas de aptidão hídrica para a cultura do café, observadas para as espécies conilon (*coffea canephora*), e arábica (*coffea arabica*), segundo MATIELLO et al. (2002) e SANTINATO et al. (2008).

Aptidão	Deficiência Hídrica (mm)	
	<i>Coffea canephora</i>	<i>Coffea arabica</i>
Apta sem irrigação	<150 mm	<100 mm
Apta com Irrigação ocasional	150-200 mm	100-150 mm
Apta com Irrigação complementar	200-400 mm	150-200 mm
Apta com Irrigação obrigatória	>400 mm	>200 mm

Fonte: Adaptada de MATIELLO et al. (2002) e SANTINATO et al. (2008).

Tabela 13: Faixas de altitude recomendadas para a cultura do café, observadas para as espécies conilon (*coffea canephora*), e arábica (*coffea arabica*), segundo BRASIL (2011).

Aptidão	Altitude	
	<i>Coffea canephora</i>	<i>Coffea arabica</i>
Faixa	Até 500 metros	Entre 500 e 900 metros

Fonte: Adaptada de BRASIL (2011).

3.4.1 Normalização dos dados

Após as conclusões do processo de reclassificação, e objetivando uma análise mais aprimorada, foi realizada a normalização dos dados com base na quantidade de pontos/pixels obtidos em cada classe dos parâmetros de temperatura, deficiência hídrica, déficit de evapotranspiração relativa e altitude, considerando-se para os cálculos, o número de pontos onde há ocorrência de café em razão do somatório de pontos que ocorrem em cada classe da cultura, sendo este resultado dividido pela quantidade total de pontos obtidos em cada classe, em razão do somatório geral de pontos que ocorrem em cada classe. As classes com valores $Npc > 1$ serão as preferenciais dentro do contexto do estudo. A Equação 20 expressa como será realizada a normalização de classes para cada um dos parâmetros supracitados:

$$Npc = \frac{\frac{p}{\sum_{p=1}^n p}}{\frac{pa}{\sum_{pa=1}^n pa}} \quad (20)$$

Onde:

p = número de pontos de ocorrência de café em uma determinada classe;

pa = total geral de pontos em uma determinada classe;

n = número de classes existentes;

N_{pc} = Normalização do número de pontos de ocorrência de café pelo total de pontos na classe observada.

3.4.2 Obtenção das faixas preferenciais, do zoneamento agroclimatológico e conclusões

Em posse dos dados resultantes da normalização, estes foram analisados, e definidas as faixas preferenciais ($N_{pc} > 1$) para temperatura, déficit de evapotranspiração relativa, deficiência hídrica e altitude, indicadas para a cultura do café na área de estudo. Posteriormente, os resultados foram contrastados com os presentes na literatura apresentada para a cultura cafeeira e com base nas informações alcançadas, foi possível gerar o mapa de zoneamento de aptidão do café para a bacia hidrográfica do rio Itapemirim considerando-se conjuntamente as áreas aptas preferenciais, as aptas conforme a literatura e as áreas inaptas. Para tanto, foram utilizadas as ferramentas “Reclassify” e “Combine” do ArcGIS 10. Concluso o zonemanto agroclimatológico, os resultados foram analisados, e por fim, obtidas as conclusões do trabalho.

3.5 Visão geral dos processos realizados

Em resumo, para execução deste trabalho foram realizados os seguintes procedimentos:

3.5.1 Levantamento bibliográfico e obtenção dos dados

Nesta etapa foram realizadas as pesquisas sobre trabalhos semelhantes e/ou correlacionados ao tema proposto, bem como a obtenção dos dados necessários para a execução dos procedimentos pertinentes ao andamento do trabalho.

3.5.2 Tratamento dos dados e geração dos mapas

Nesta etapa os dados obtidos foram tratados, de modo a eliminar dados espúrios ou não condizentes com a realidade do estudo. Após os tratamentos

foram gerados os mapas de altitude, latitude, longitude, temperatura, precipitação, solos, capacidade de armazenamento disponível e localização do café.

3.5.3 Algoritmos de obtenção do balanço hídrico, déficit de evapotranspiração e correlações

Nesta etapa, foram desenvolvidos os algoritmos computacionais utilizando-se da linguagem Python e da biblioteca Arcpy disponível no ArcGis 10, de forma a otimizar a realização de todos os processamentos pertinentes ao balanço hídrico normal climatológico, possibilitando assim os cálculos pixel a pixel e conseqüentemente a geração dos mapas para os parâmetros de ETP, P-ETP, NAC, ARM, ALT, ETR, DEF e EXC para a área de estudo. Posteriormente fora desenvolvido o algoritmo de geração do mapa de déficit de evapotranspiração relativa expresso pela relação ($DER = 1 - ETR/ETP$). Por fim, foram desenvolvidos os algoritmos que possibilitaram as correlações entre as variáveis de estudo e os pontos de ocorrência do café na área de estudo.

3.5.4 Classificação e normalização dos dados

Neste ponto foram realizadas as classificações dos parâmetros edafoclimáticos anteriormente correlacionados aos pontos de localização da cultura cafeeira na área de estudo. Após a classificação, os dados foram normalizados por meio da divisão do número de ocorrências dos pontos de café em cada classe obtida, pelo somatório do número de ocorrências de pontos do café em todas as classes observadas, e este resultado, em razão do número de ocorrências de cada classe para a área total, pelo somatório do número de ocorrências de pontos da área total em todas as classes observadas. O processo foi realizado por meio dos algoritmos de normalização dos dados, desenvolvidos com 30 classes de intervalos equidistantes entre os valores máximo e mínimo de cada parâmetro analisado.

3.5.5 Faixas preferenciais, zoneamento agroclimatológico e conclusões

Nesta etapa, com base nas normalizações, foram definidas as faixas preferenciais para a cultura em estudo, e com base nestas, fora realizado o zoneamento agroclimatológico possibilitando por fim, a análise dos resultados e as conclusões do trabalho.

3.5.6 Fluxograma de visão geral dos processos

Uma visão geral dos processos realizados englobando desde a obtenção dos dados fonte até o zoneamento agroclimatológico, pode ser obtida por meio do fluxograma apresentado na Figura 8.

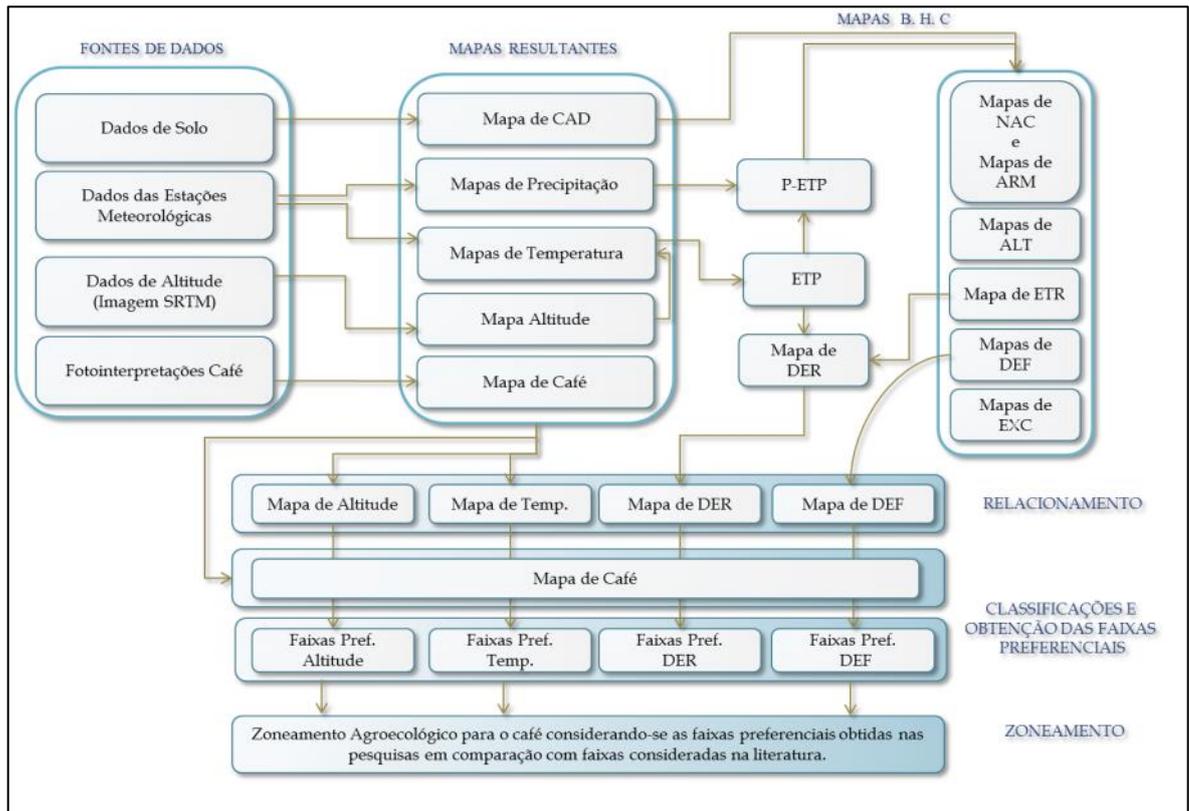


Figura 8. Visão geral dos procedimentos desenvolvidos no trabalho.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos possibilitaram a elaboração dos mapas de altitude, latitude, longitude, solos, capacidade de armazenamento disponível e localização do café, juntamente com os mapas mensais de temperatura, precipitação (P), evapotranspiração potencial (ETP), precipitação menos evapotranspiração potencial (P-ETP), negativo acumulado (NAC), armazenamento (ARM), alteração (ALT), evapotranspiração real (ETR), deficiência hídrica (DEF), excedente hídrico (EXC) e déficit de evapotranspiração relativa (DER). O conjunto de mapas supracitado proporcionou uma análise apurada da distribuição espacial e temporal, possibilitando as observações pretendidas para a cultura do café na área de estudo.

4.1 Mapas de altitude, longitude e latitude

O mapa do modelo digital de elevação (MDE), para a área de estudo pode ser observado por meio da Figura 9. Os resultados apresentaram altitudes variando entre -4 a 2854 metros, sendo que as maiores altitudes estão localizadas na região do Caparaó a montante da bacia e as menores altitudes a jusante (destacando-se a região de Itapemirim e Marataízes). O mapa de altitudes foi utilizado como parâmetro para geração dos mapas de latitude e longitude apresentados conforme Figura 10, Figura 11 e metodologia já descrita.

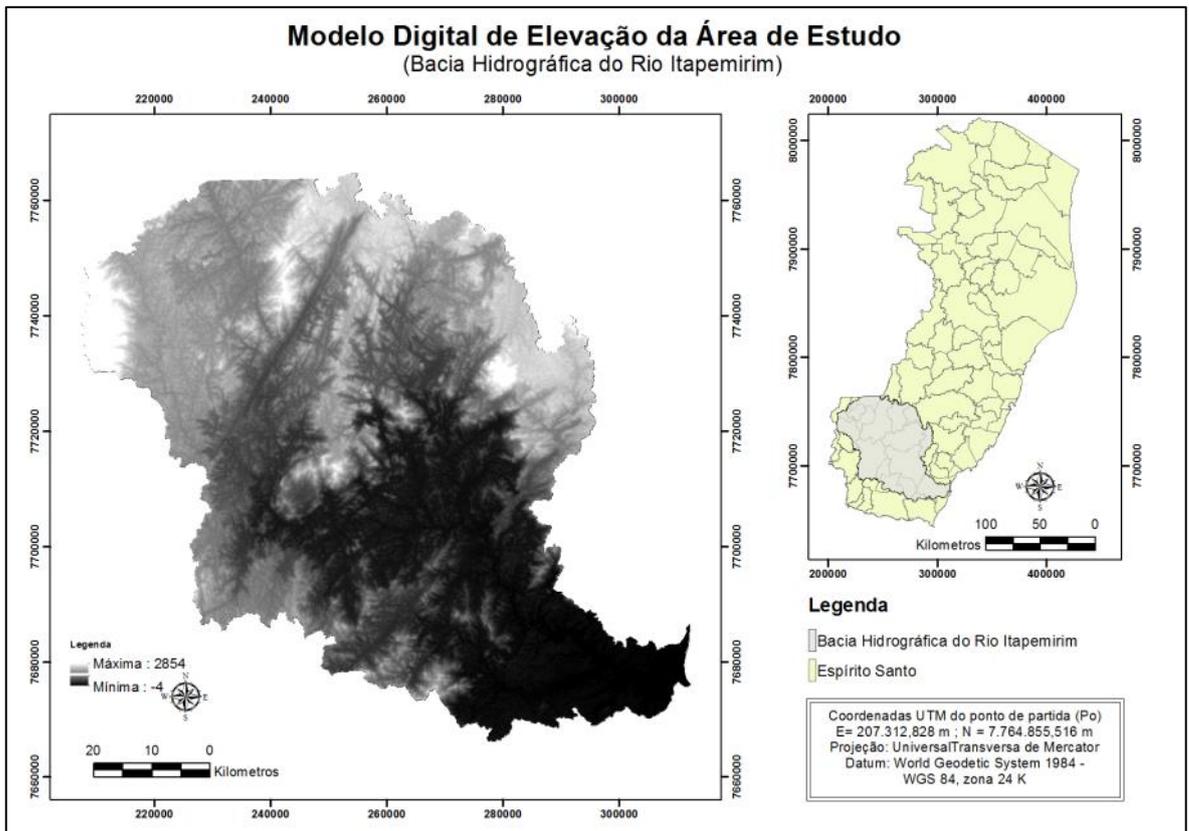


Figura 9. Modelo digital de elevação da bacia hidrográfica do rio Itapemirim

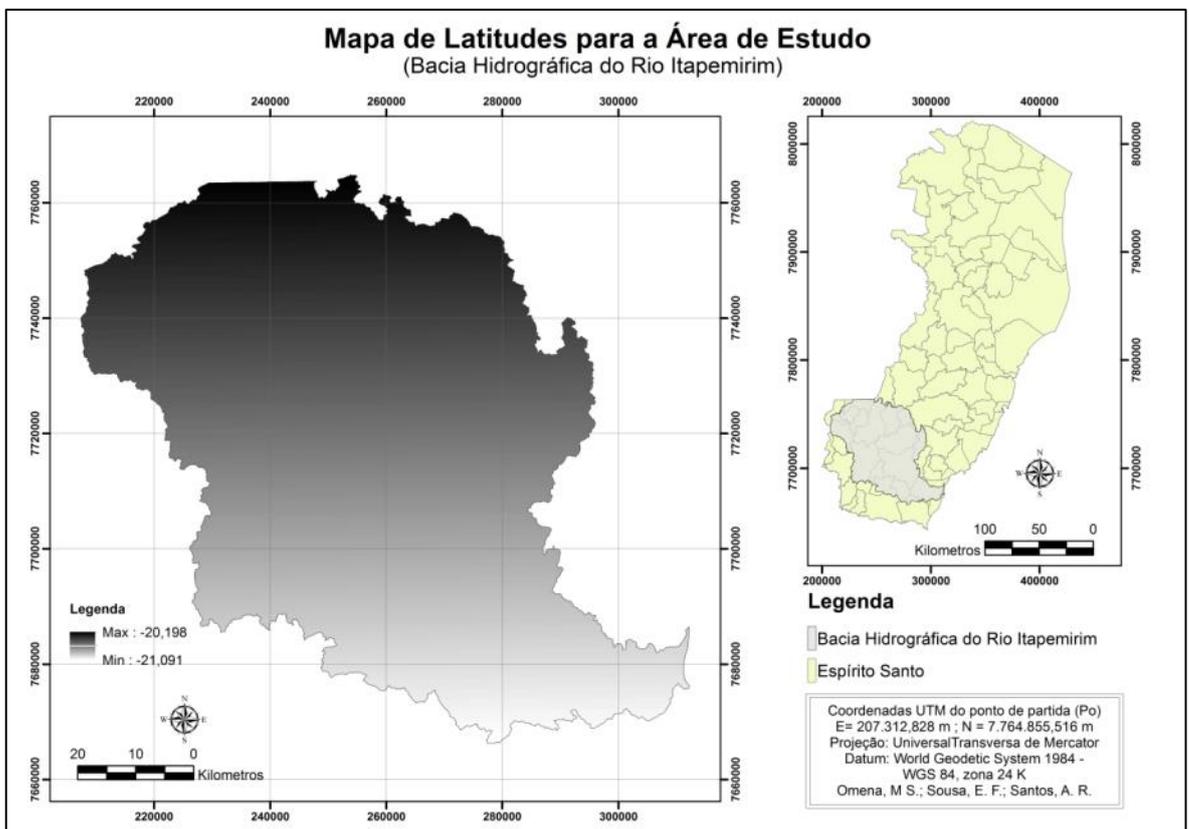


Figura 10. Ocorrência de latitudes para a área de estudo.

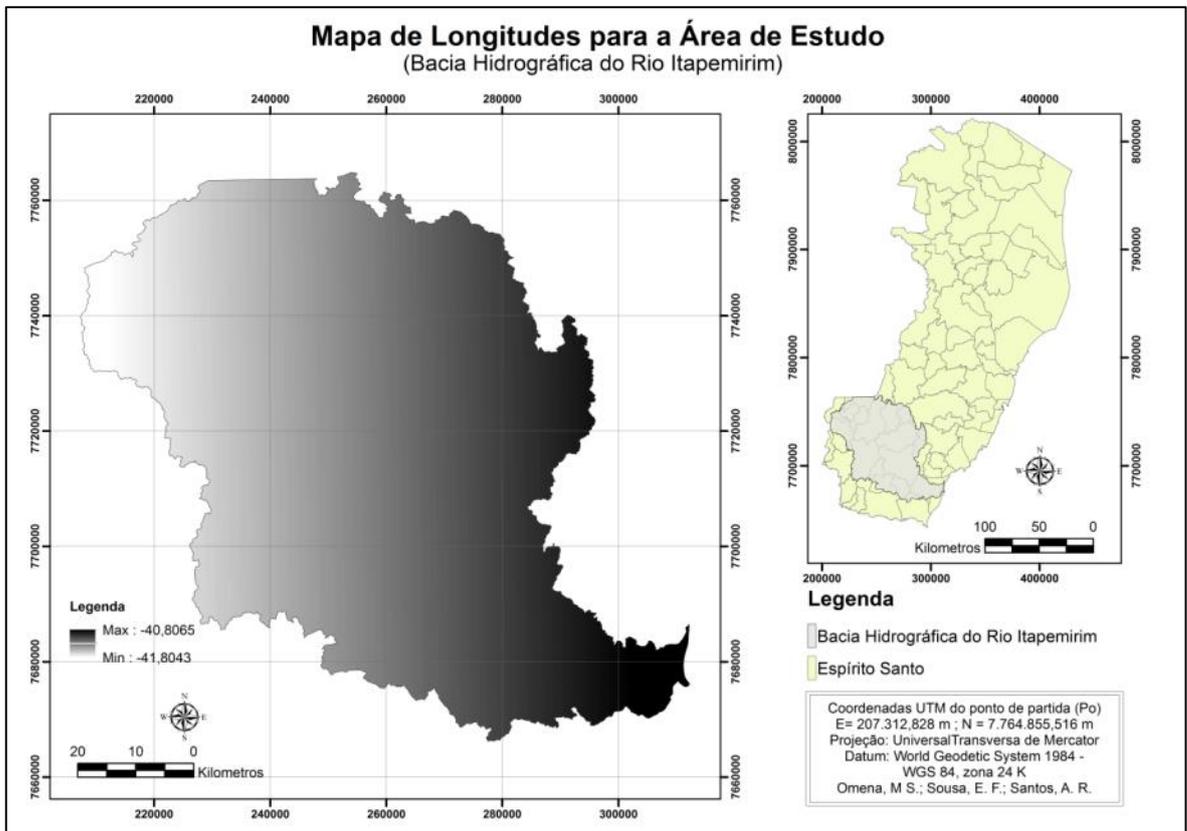


Figura 11. Ocorrência de longitudes para área de estudo.

4.2 Mapas de temperatura e precipitação

Com base nas regressões lineares múltiplas e nos mapas de altitude, longitude e latitude, foram obtidos os mapas de temperatura que podem ser observados por meio da Figura 12.

Nos resultados obtidos, os meses de outubro a abril foram os que apresentaram as temperaturas mais elevadas, sendo os mapas resultantes observados entre maio e agosto, os que apresentaram as temperaturas mais baixas. Também é importante destacar, que com respeito à fenologia do café, segundo MEIRELES (2009), os resultados são semelhantes aos observados para as condições tropicais do Brasil, onde a primeira fase fenológica do café (setembro a março), é caracterizada por dias longos, com fotoperíodos de 13 a 14 horas de luz efetiva, sendo a segunda fase (abril até agosto), caracterizada por dias mais curtos, e menor quantidade de luz efetiva.

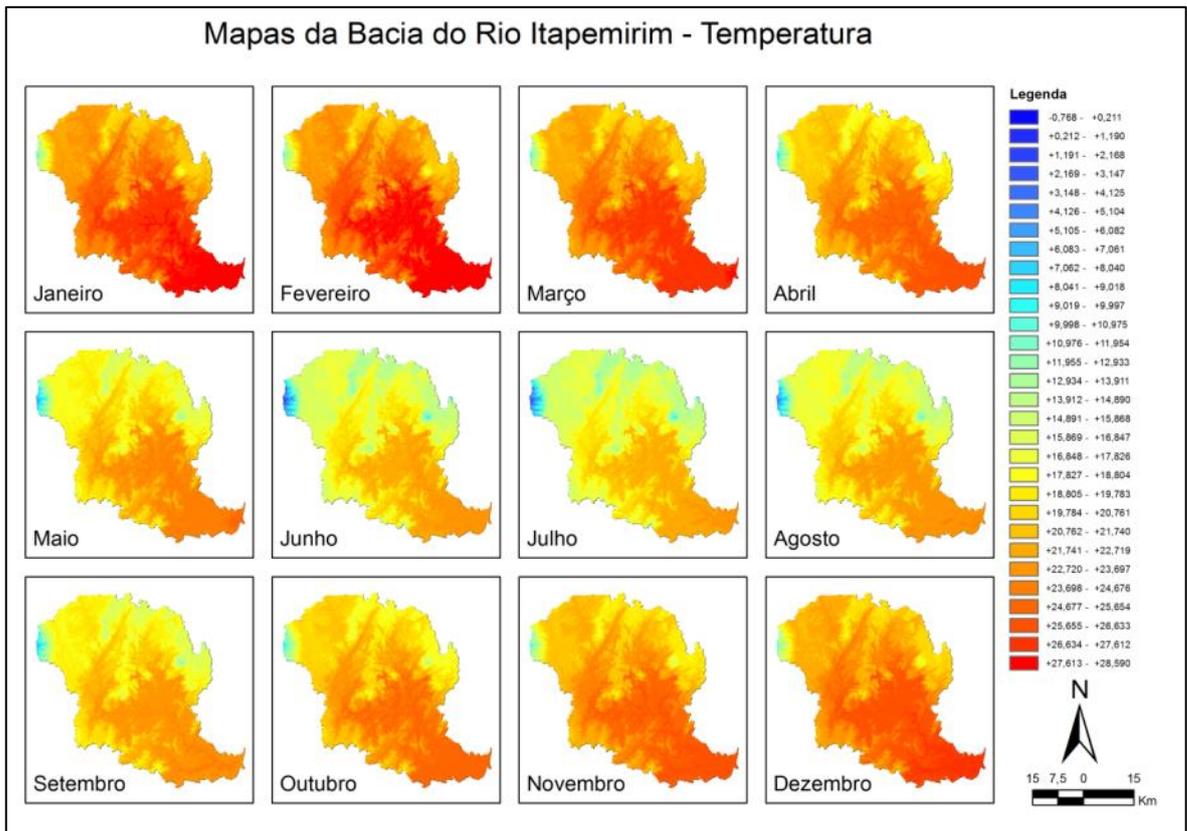


Figura 12. Resultados mensais de temperatura para cada pixel da bacia hidrográfica do rio Itapemirim.

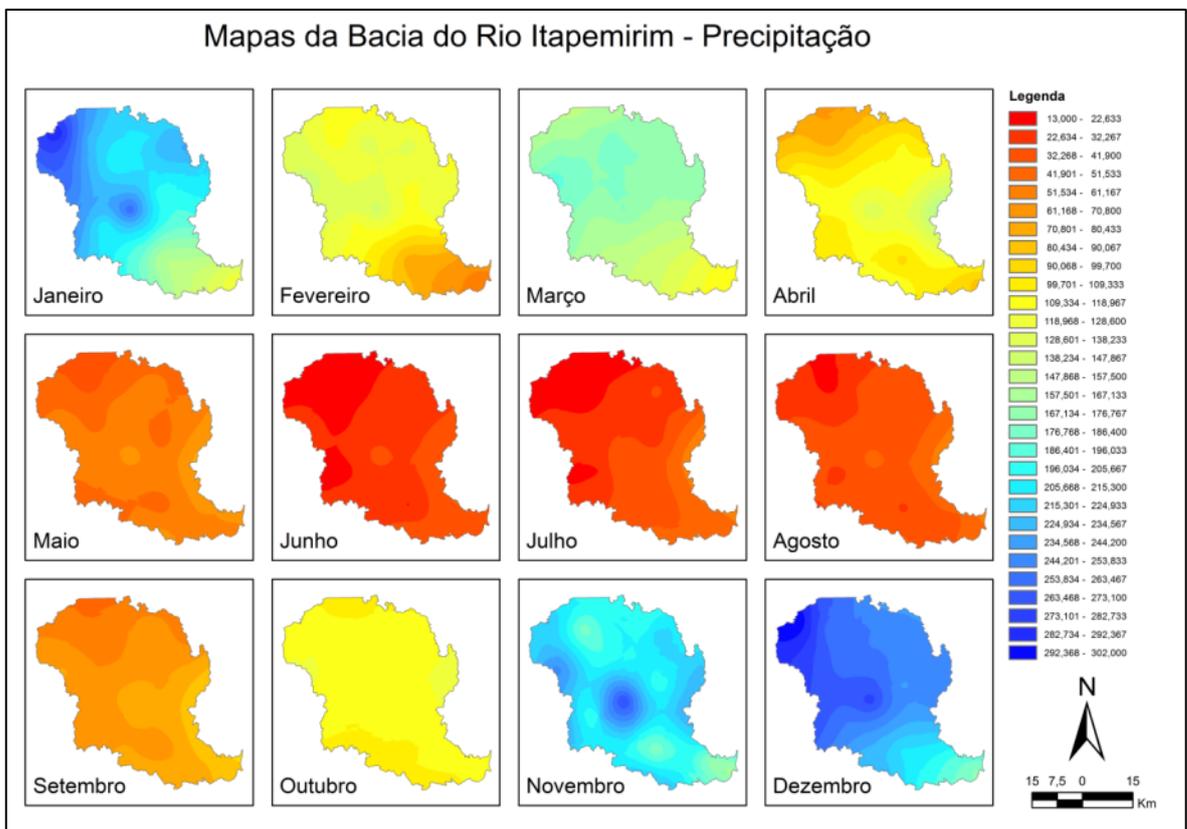


Figura 13. Mapas mensais de precipitação para a bacia do rio Itapemirim

Já os resultados obtidos para os mapas de precipitação podem ser observados por meio da Figura 13. Analisando os meses, pode-se constatar que os períodos de maior precipitação ocorreram em novembro, dezembro, janeiro e março. Também é possível identificar que o mês de fevereiro, bem como o intervalo de abril a outubro apresentaram menores volumes de precipitação.

4.3 Mapa de solos e capacidade de água disponível (CAD).

O mapa de solos da bacia hidrográfica do rio Itapemirim, pode ser observado por meio da Figura 14.

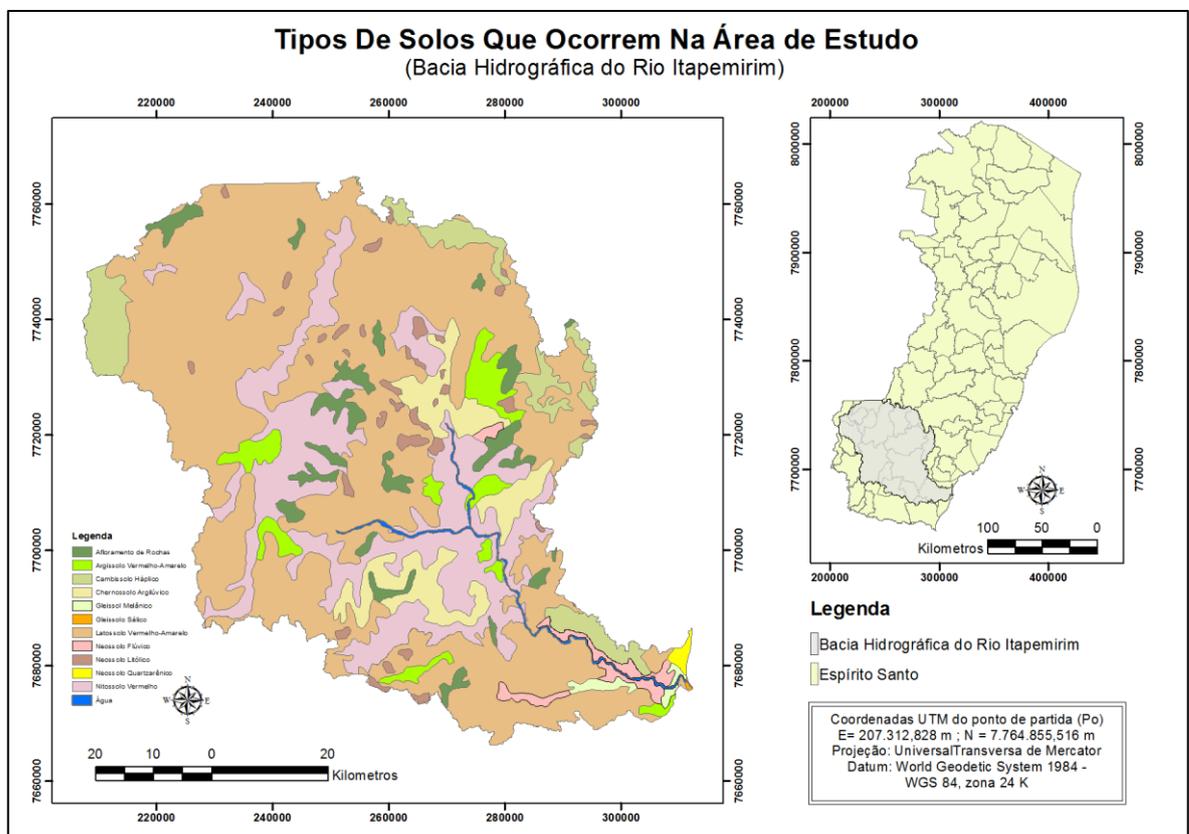


Figura 14. Tipos de solos que ocorrem na bacia do rio Itapemirim.

Por meio dos resultados foi possível verificar que a área da bacia hidrográfica do rio Itapemirim é constituída com 58,12% de Latossolo Vermelho-Amarelo, 18,29% de Nitossolo Vermelho, 5,8% de Chernossolo Argilúvico, 5,57% de Cambissolo Háplico, 4,14% de Afloramento de Rochoso, 3,47% de Argissolo Vermelho-Amarelo, e 4,6% de outros tipos de formação. Os percentuais relativos a cada tipo de solo calculados para a área de estudo podem ser observados em sua totalidade por meio da Tabela 14.

Tabela 14. Tipos de solos que ocorrem na bacia hidrográfica do rio Itapemirim ordenados conforme maiores representações percentuais.

Tipo de Solo	Percentual
Latossolo Vermelho-Amarelo	58,12
Nitossolo Vermelho	18,29
Chernossolo Argilúvico	5,80
Cambissolo Háptico	5,58
Afloramento de Rochas	4,14
Argissolo Vermelho-Amarelo	3,47
Neossolo Litólico	1,77
Neossolo Flúvico	1,37
Água	0,72
Gleissol Melânico	0,50
Neossolo Quartzarênico	0,22
Gleissolo Sáfico	0,02

Em posse dos dados referentes aos tipos de solos e da aplicação dos critérios metodológicos pertinentes, foi determinada a CAD para a área de estudo pixel a pixel. Os resultados podem ser observados por meio da Figura 15.

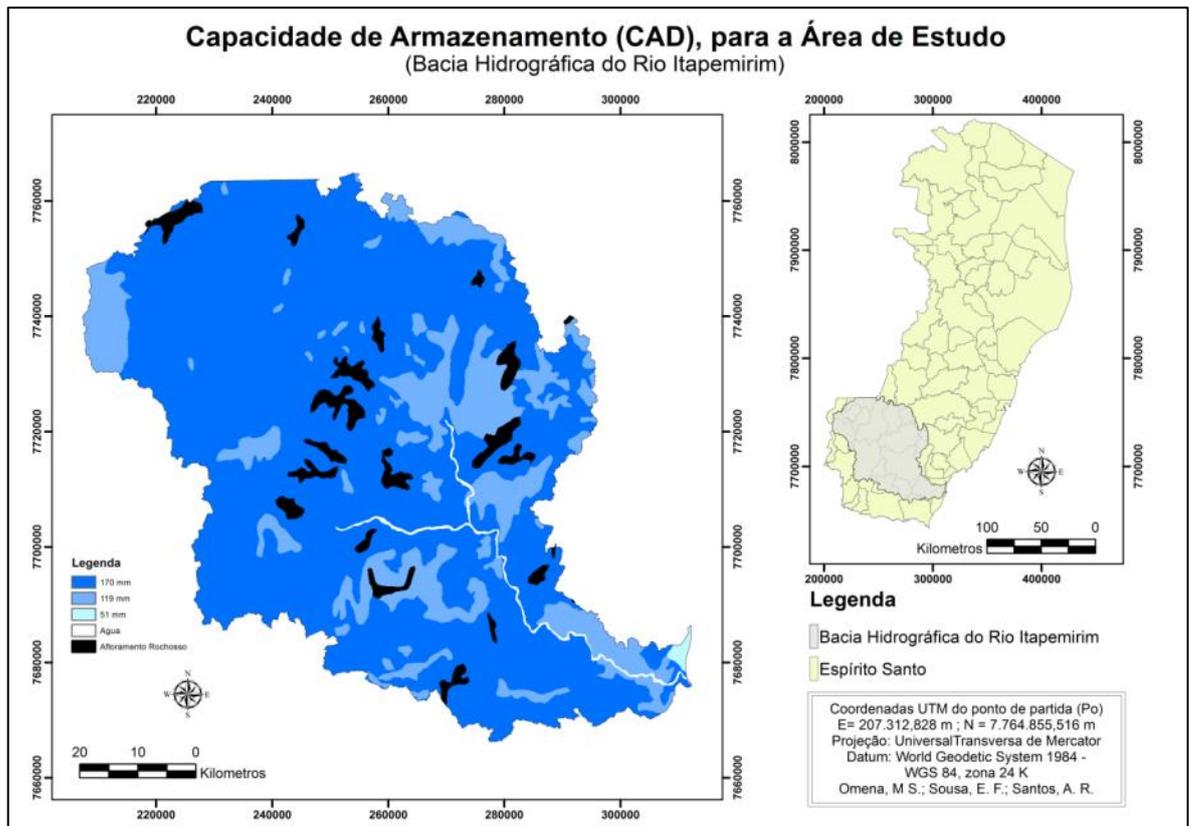


Figura 15. Mapa de capacidade de armazenamento (CAD), para a bacia hidrográfica do rio Itapemirim

Por meio dos resultados obtidos, pode-se observar que cerca de 77% da área de estudo possui solo com capacidade de armazenamento de 170 mm, seguido por uma área correspondente a 18% com capacidade de 119 mm, cerca de 4,86% da área é ocupada por água e rocha, e por fim, uma área menor de apenas 0,22%, com capacidade de armazenamento de água de 51 mm.

4.4 Mapa de localização do café

O mapa de ocorrência do café pode ser observado por meio da Figura 16.

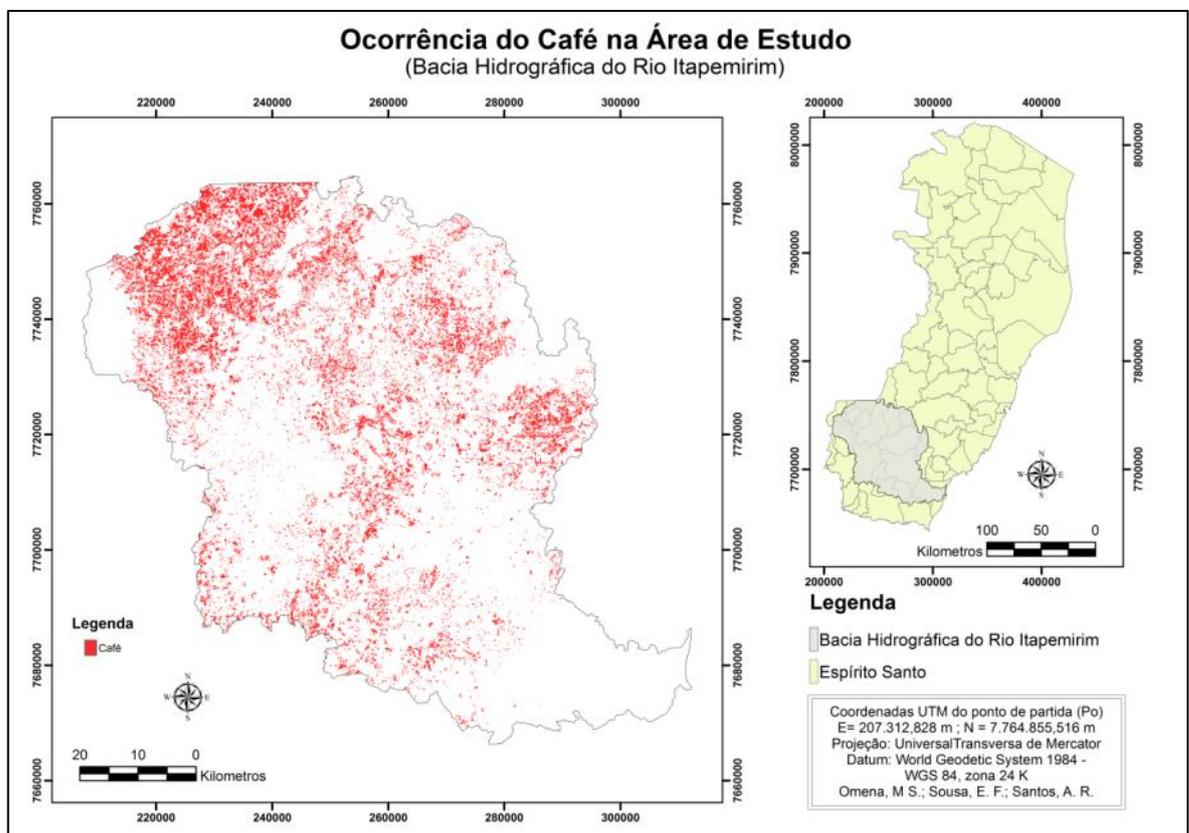


Figura 16. Mapa de ocorrência do café para a bacia hidrográfica do rio Itapemirim

Na Figura 16 é possível observar uma grande concentração de café na parte superior da bacia hidrográfica do rio Itapemirim, abrangendo principalmente os municípios de Ibatiba, Iúna, Ibitirama, Irupi.

4.5 Mapas resultantes do balanço hídrico climatológico

Neste trabalho, foram elaborados os mapas mensais pixel a pixel, condizentes com os parâmetros necessários a efetivação do balanço hídrico normal climatológico. Os cálculos de aferição para todos os pixels resultantes do processo apresentaram resultados coerentes e são detalhados por meio do apêndice 1. É importante destacar que os resultados que envolvem o mapa de capacidade de água disponível (CAD), foram reprocessados de forma a excluir todos os pontos de ocorrência de rios ou afloramentos rochosos. Assim, os valores em cinza observados nos mapas, não representam informações, e sim, pontos onde ocorre a presença de água ou rocha, e que foram extraídos dos mapas para que não houvesse inconsistências nos resultados apresentados.

4.5.1 Mapas de evapotranspiração potencial (ETP)

Os resultados alcançados para evapotranspiração potencial podem ser observados por meio da Figura 17.

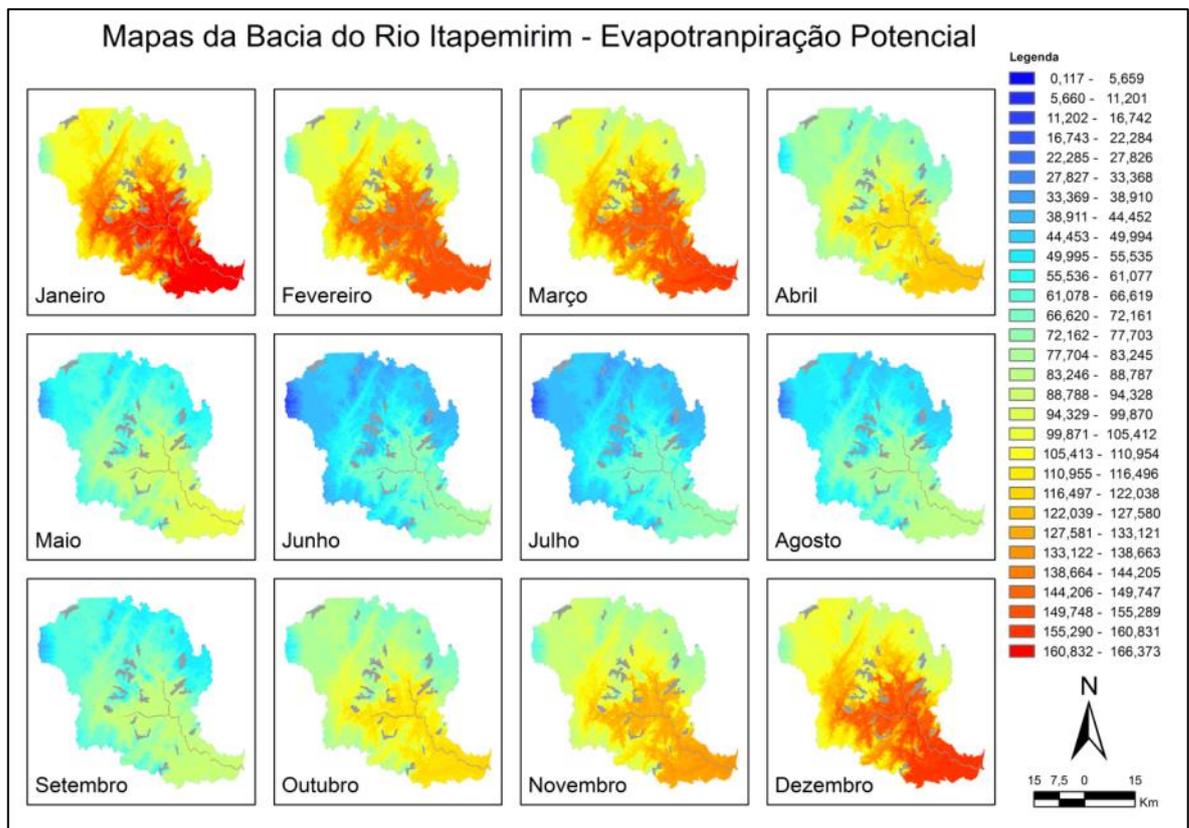


Figura 17. Mapas de evapotranspiração potencial para a bacia hidrográfica do rio Itapemirim.

Com relação aos resultados de ETP observa-se que os meses de maior destaque ocorrem no intervalo de dezembro a março e os meses com menores valores de junho a agosto, sendo os meses restantes considerados como intermediários.

4.5.2 Mapas de precipitação menos evapotranspiração potencial (P-ETP)

Os mapas mensais resultantes deste processo podem ser observados por meio da Figura 18.

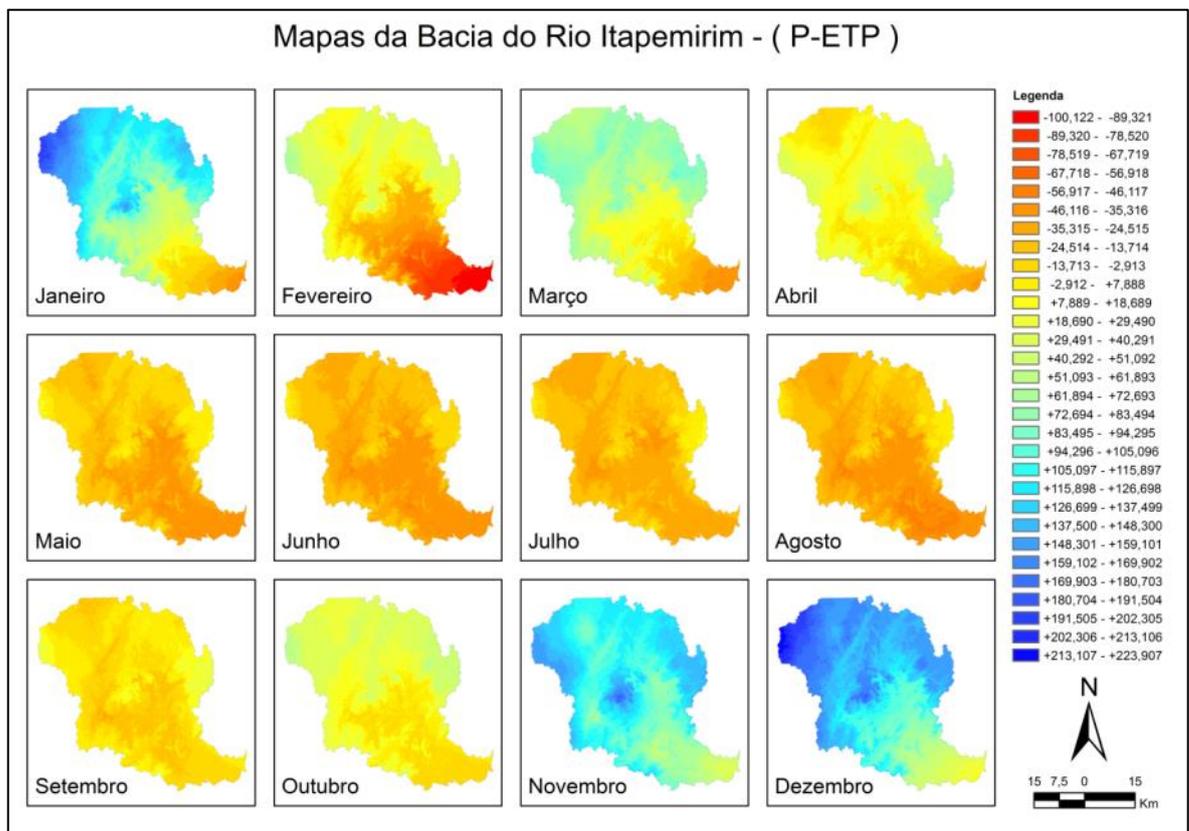


Figura 18. Mapas resultantes do processo de cálculo entre os dados de precipitação menos evapotranspiração potencial pixel a pixel.

Os resultados obtidos estão de acordo com os que normalmente são observados quando se utilizam valores normais de temperatura local, que segundo PEREIRA, et al. (2007), resultam na ocorrência de um conjunto de valores positivos seguido por outro conjunto de valores negativos de precipitação menos evapotranspiração potencial (P-ETP), apesar de neste caso os meses de fevereiro e março apresentarem uma quebra na sequência de valores destes conjuntos.

4.5.3 Mapas de negativo acumulado (NEG.ACUM) e armazenamento de água no solo (ARM)

Os resultados para os mapas mensais de valores negativos acumulados (NEG. ACUM) e Armazenamento de água no solo (ARM), podem ser observados por meio da Figura 19 e Figura 20.

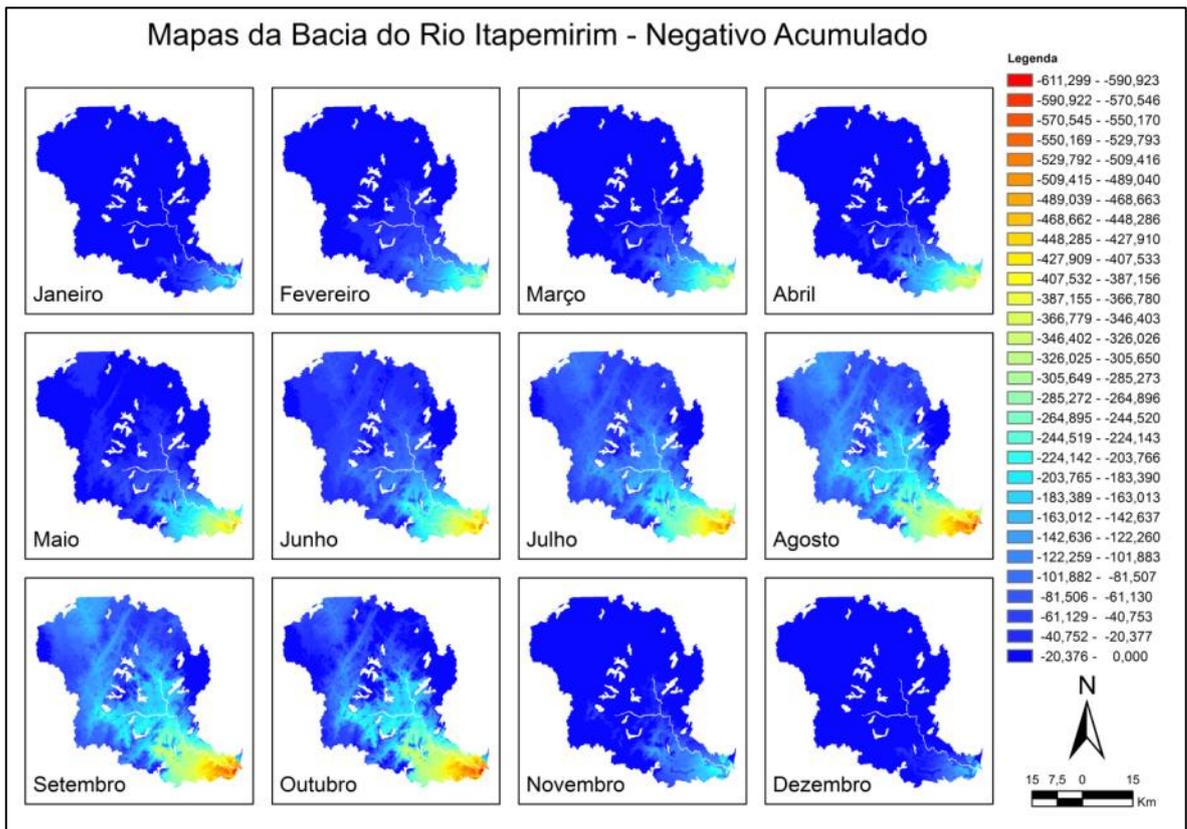


Figura 19. Mapas resultantes para o processo de cálculos pixel a pixel para negativo acumulado.

As avaliações indicaram que no intervalo de maio a outubro ocorrem os maiores valores de negativo acumulado, estando estes resultados diretamente relacionados com o armazenamento de água disponível no solo em consequência da menor quantidade de precipitação. Também foi possível observar que no intervalo entre novembro e abril têm-se menores valores de negativo acumulado em consequência dos maiores valores de precipitação para o referido período.

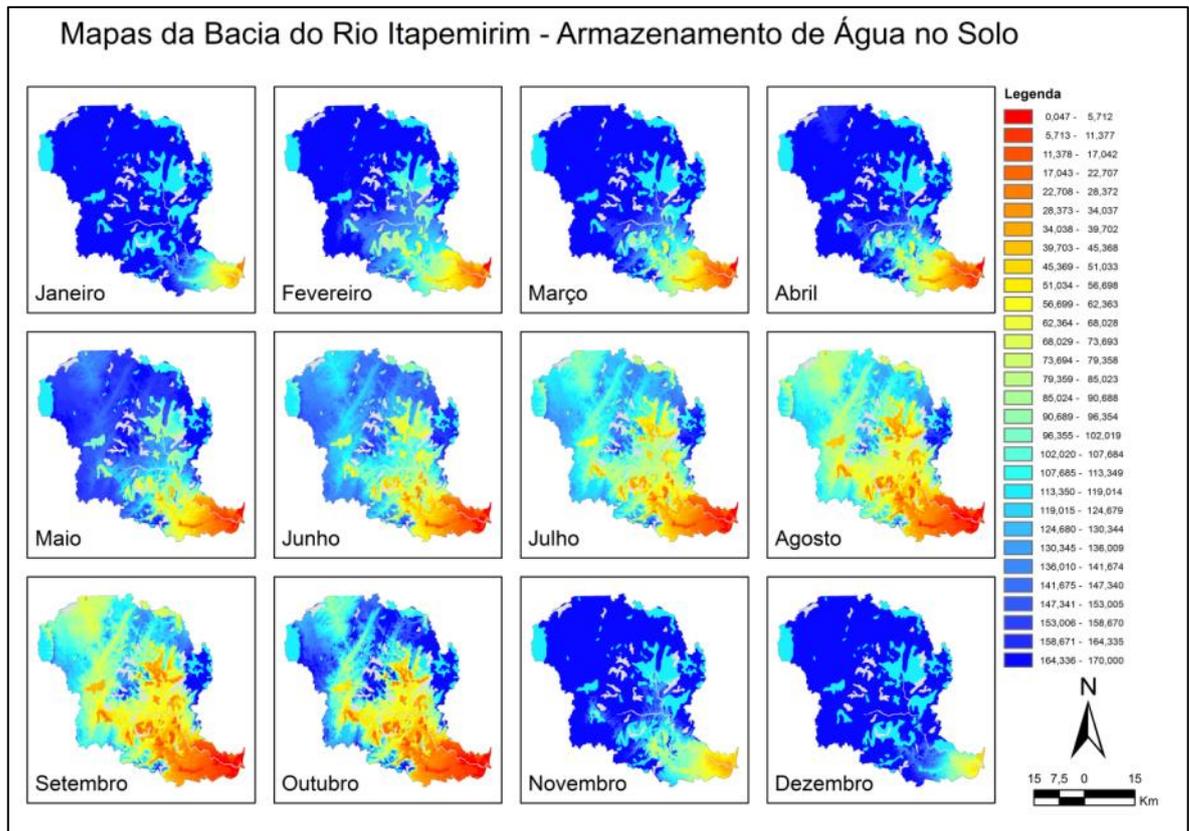


Figura 20. Mapas resultantes para o processo de cálculos pixel a pixel para armazenamento de água no solo.

Também é importante observar que, como os valores de armazenamento de água no solo estão associados à intensidade de precipitação ocorrida, a partir de maio, verifica-se uma expressiva queda no armazenamento desta, perdurando até o mês de outubro. Já os maiores valores de armazenamento ocorrem no período de novembro a março, intervalo em que se observam precipitações mais acentuadas, as quais proporcionam o abastecimento do solo.

4.5.4 Mapas de alteração (ALT)

No presente estudo, o mês onde a ocorrência de alteração negativa predominou mais fortemente foi o de fevereiro. Entretanto, os meses de janeiro, bem como o intervalo de março a agosto também são evidenciados pela alteração negativa, (ou seja, retirada de água do solo). No mês de setembro é possível verificar que alguns pontos têm uma certa alteração positiva, e por fim, os meses

de outubro, novembro e dezembro se destacam como meses de reposição de água, sendo novembro o mês de maior reposição de água no solo para a região em estudo. Os resultados para a área de estudo observados para alteração de água no solo podem ser verificados por meio da Figura 21.

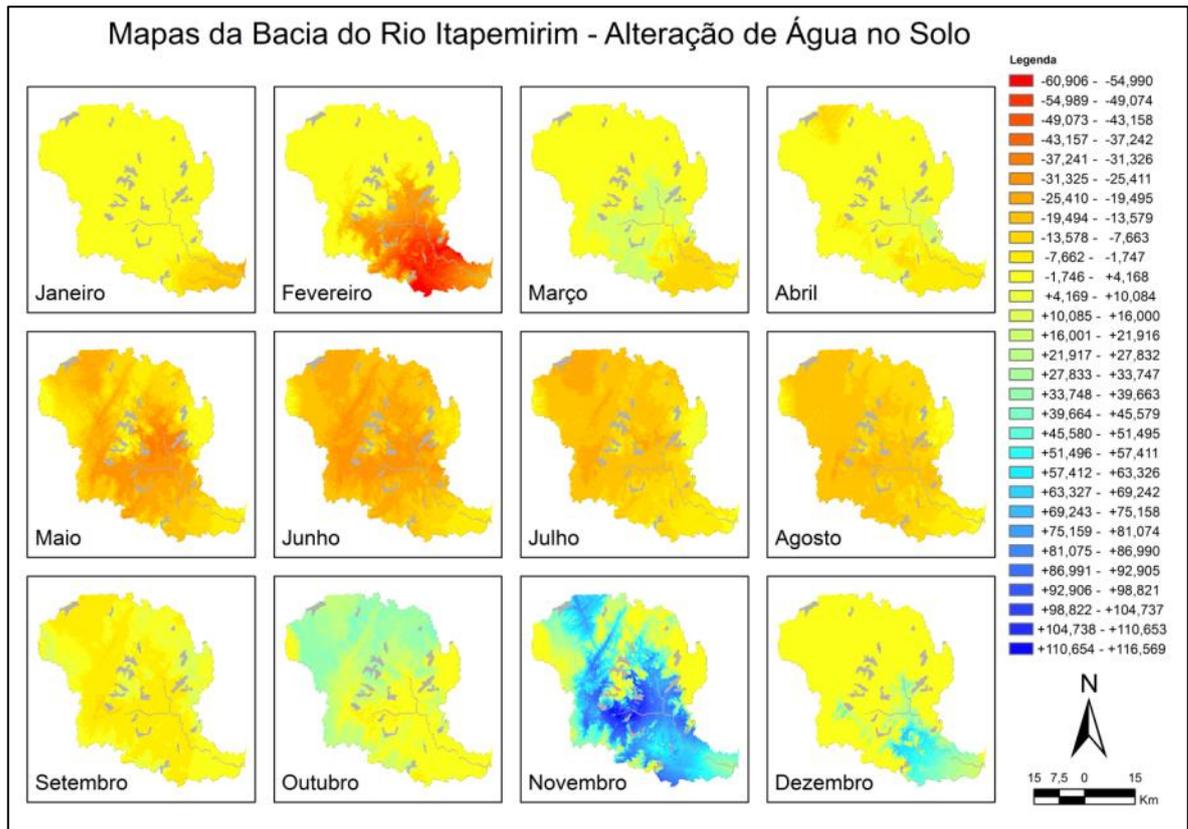


Figura 21. Mapas resultantes para o processo de cálculos pixel a pixel para a alteração de água no solo.

4.5.5 Mapas de evapotranspiração real (ETR)

A Figura 22 apresenta os resultados obtidos para os mapas de evapotranspiração real na área de estudo. Neste, verificou-se que os valores mais altos para ETR ocorrem entre os meses de novembro a março, notoriamente meses de temperaturas mais altas e/ou dias mais longos, destacando-se aqui os meses de dezembro e janeiro. Já os meses com menores valores obtidos para ETR, ocorreram entre maio e setembro, destacando-se junho e julho, meses de

temperaturas mais amenas e dias mais curtos. Por fim, os meses de abril e outubro foram considerados meses intermediários (ou transitórios) entre os referenciados como sendo de maiores e menores valores para este parâmetro.

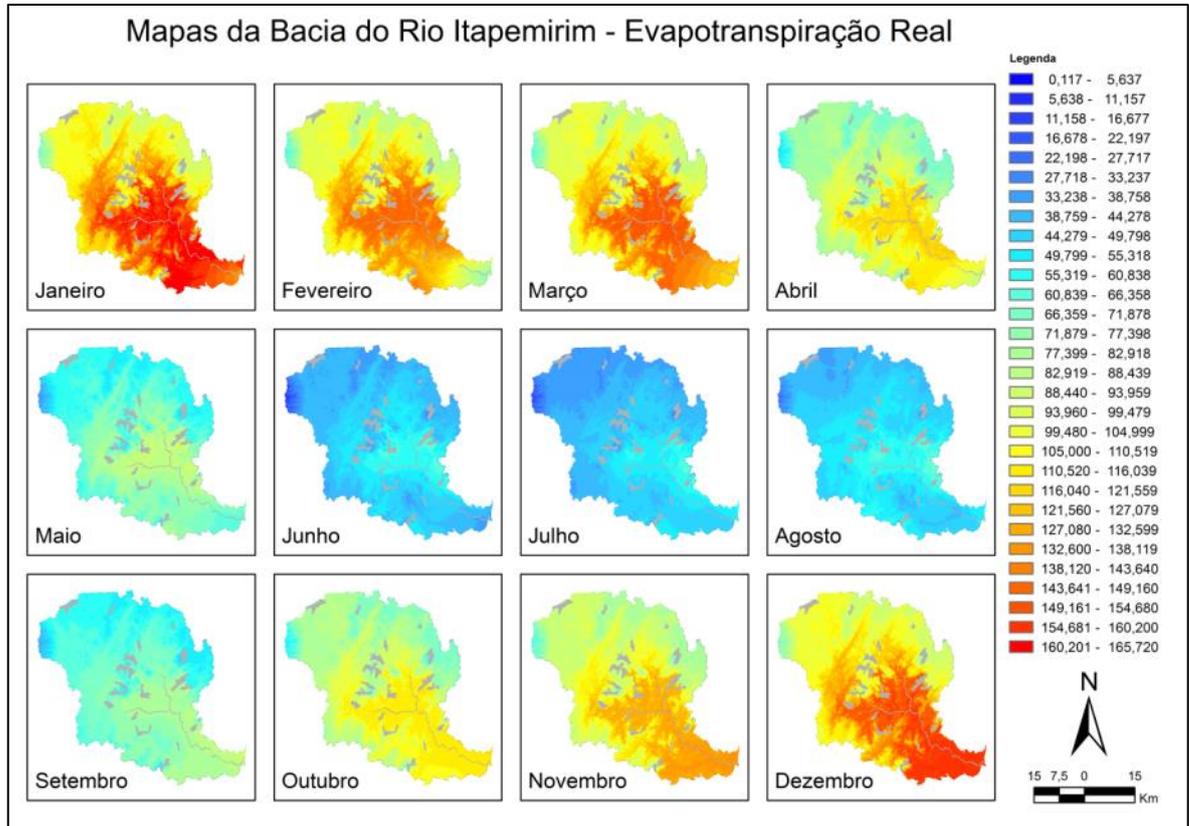


Figura 22. Mapas resultantes para o processo de cálculos pixel a pixel para a evapotranspiração real.

4.5.6 Mapas de deficiência hídrica (DEF)

No presente estudo, apresentaram maiores deficiências hídricas, o mês de fevereiro e o intervalo de maio até setembro. Já como meses de menor deficiência, fora observado o intervalo de outubro a janeiro e os meses de março e abril, conforme Figura 23.

Com base nos resultados obtidos é importante destacar, que quanto à fenologia do café, com base em MEIRELES (2009), os resultados estão condizentes com os observados para a cultura nas condições tropicais do Brasil,

pois a terceira fase fenológica da cultura (setembro a dezembro), possui como característica o aumento do potencial hídrico nas gemas após um período de restrição hídrica, o que verifica-se nos mapas do referido período. Outra observação importante refere-se à quarta fase (janeiro a março), onde se pode observar nas áreas mais baixas da bacia (e de maior temperatura), a ocorrência de estresse hídrico elevado nos meses de fevereiro, bem como, entre os meses de maio e agosto, indicando que estas, são regiões não recomendadas para o plantio, dado que o estresse nesta fase pode ser prejudicial, resultando normalmente em frutos mal granados.

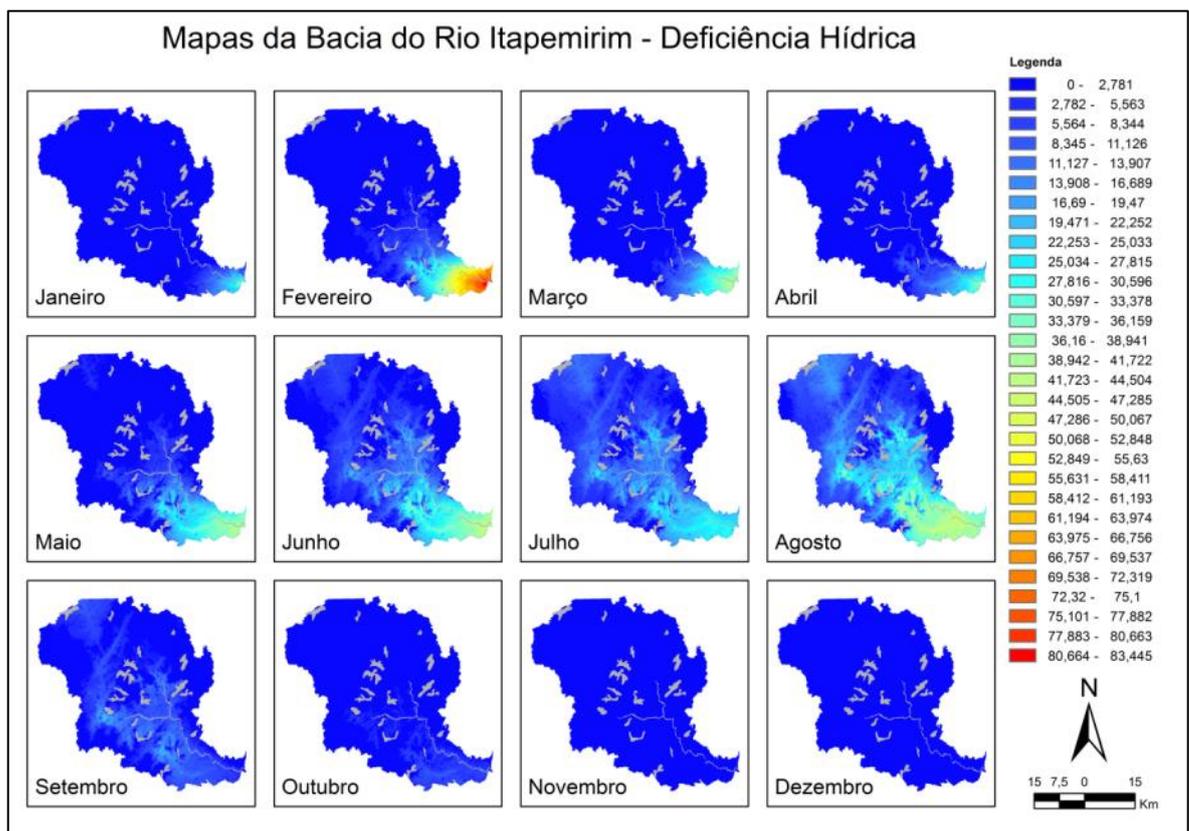


Figura 23. Mapas resultantes para o processo de cálculos pixel a pixel para a deficiência hídrica.

4.5.7 Mapas de excedente hídrico (EXC)

Os mapas resultantes do processo de cálculo para excedente hídrico podem ser visualizados por meio da Figura 24.

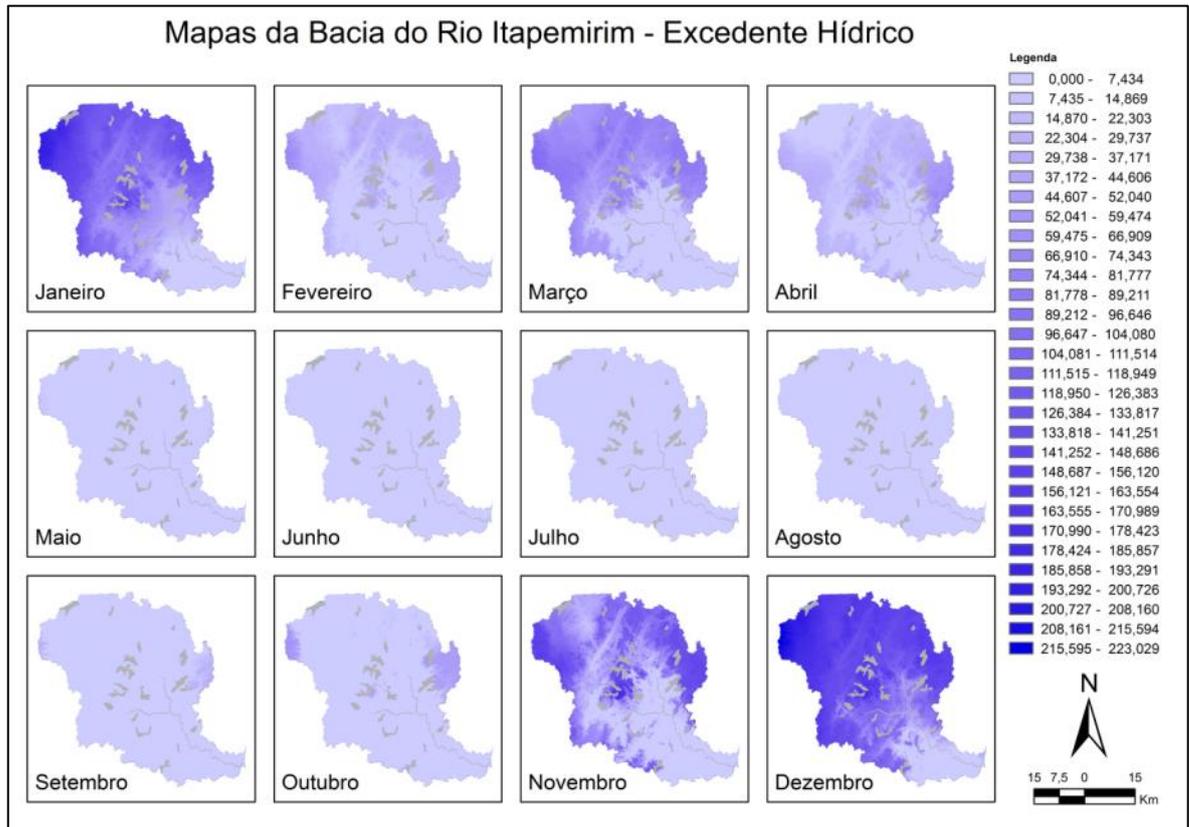


Figura 24. Mapas resultantes para o processo de cálculos pixel a pixel para excedente hídrico.

Os resultados para excedente hídrico apresentaram como período de maior destaque, o trimestre de dezembro a janeiro, e ainda o mês de março, sendo condizentes com a realidade (visto que estes são os meses em que ocorrem os valores mais altos para precipitação na área de estudo). É importante citar que o conhecimento das áreas e meses em que ocorrem os maiores excedentes pode contribuir substancialmente para melhor aproveitamento da água, bem como o correto manejo de áreas onde se evidencia tal situação.

4.5.8 Mapas de déficit de evapotranspiração relativa

Os resultados demonstraram que grande parte da área possui (segundo este parâmetro de análise), baixas perdas de produção, sendo que as maiores perdas estão concentradas nas partes mais baixas da bacia, onde ocorrem as maiores temperaturas e os menores volumes de precipitação. O mapa resultante

do processo de cálculo para déficit de evapotranspiração relativa pode ser observado por meio da Figura 25.

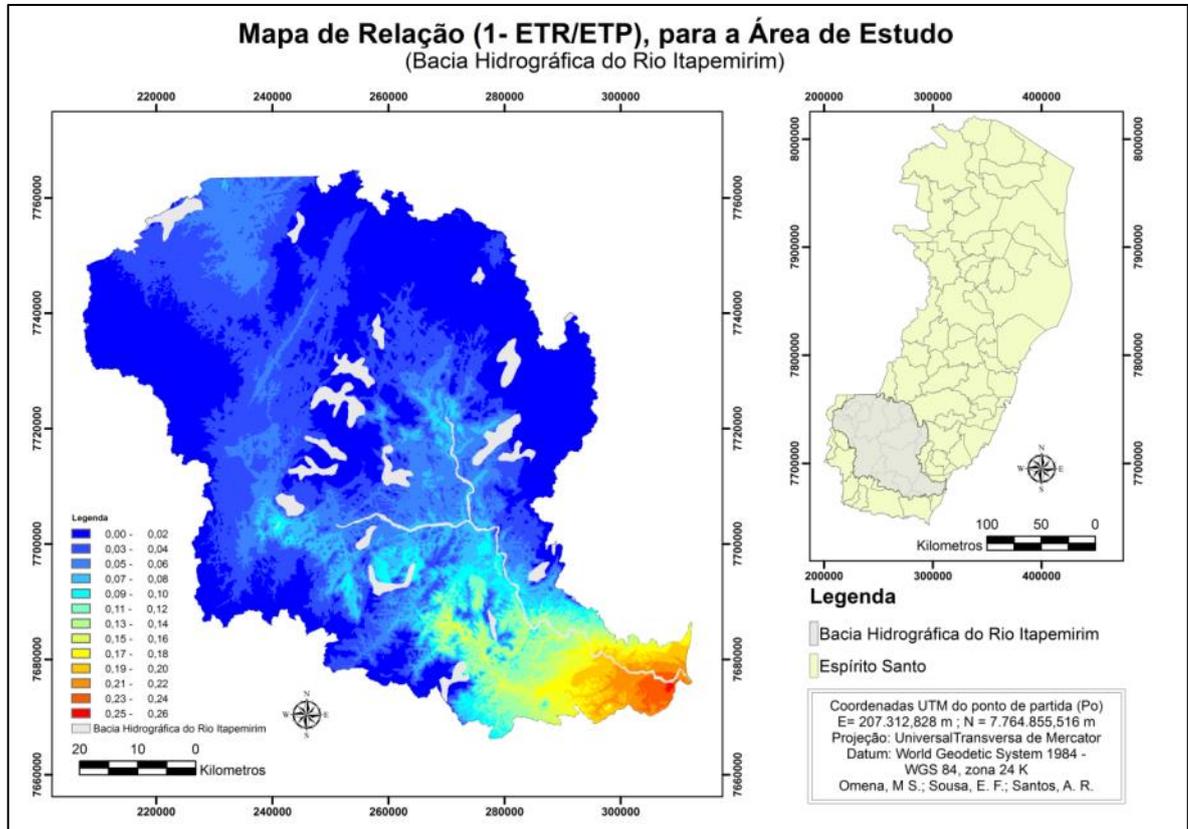


Figura 25. Déficit de evapotranspiração relativa pixel a pixel para a bacia hidrográfica do rio Itapemirim.

4.6 Mapas de temperatura para o café

Realizado o processo de relacionamento entre os pixels de temperatura e os pixels de localização do café, observou-se que no intervalo de janeiro a dezembro, a maior temperatura obtida para a área de estudo nos pontos onde há ocorrência de café foi de 28,53°C. Entretanto, o maior valor para temperatura média anual nos pontos onde ocorre o café no mesmo período foi de 25,55°C. Com relação à temperatura mínima durante o período, constata-se que o menor valor foi 10,71°C, sendo a menor temperatura média anual em torno de 15,04°C. Também foram observados por meio do mapa de somatório das temperaturas, os pontos onde se localizam as maiores somas térmicas anuais, e constatou-se que os maiores valores para somatório de temperatura nos pontos de localização do café, ocorrem principalmente nas regiões de Cachoeiro de Itapemirim, Castelo, Presidente Kennedy, Jerônimo Monteiro e Atílio Vivácqua. Os valores de temperatura observados para a referida cultura são apresentados por meio da Figura 26.

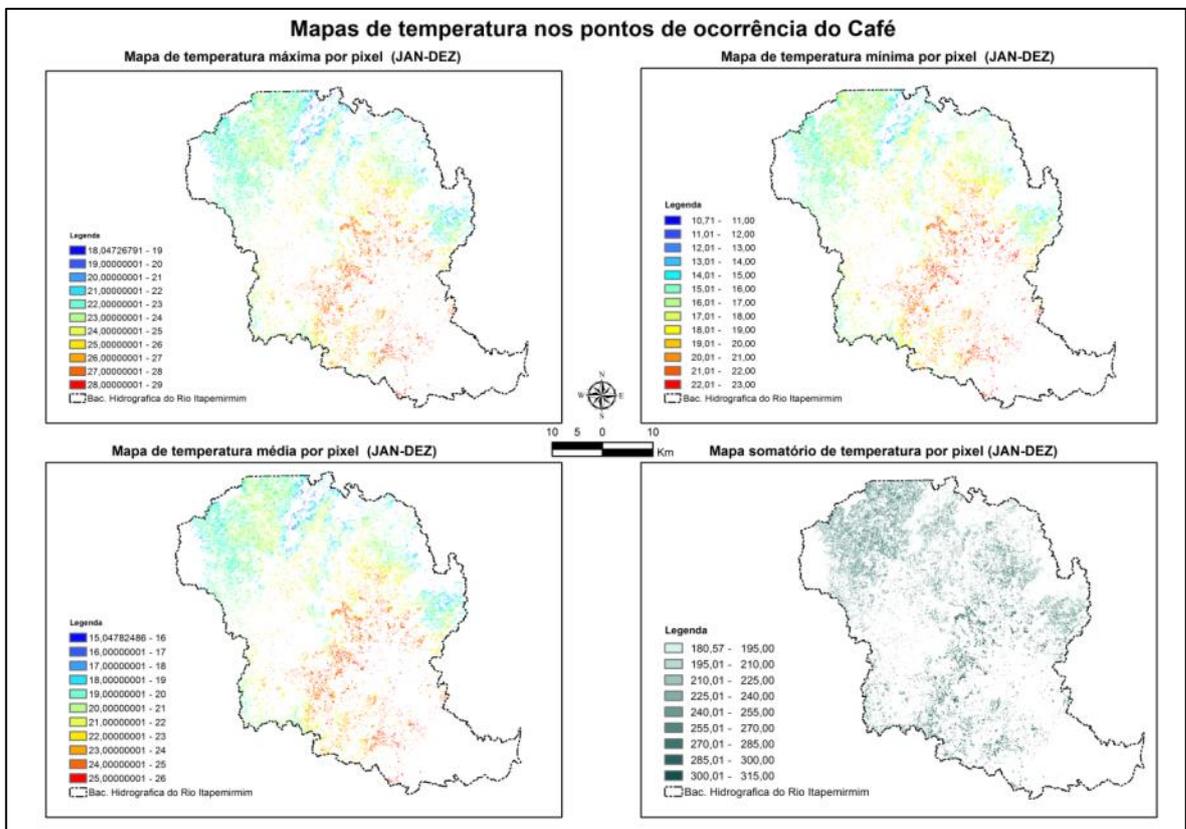


Figura 26. Valores máximos, médios e mínimos anuais além do somatório de todos os valores mensais para temperatura nos pixels de ocorrência do café.

Constatou-se que em cerca de 85,77% da área de estudo, as temperaturas médias ocorrem entre 19 e 26°C, o que pode ser observado por meio da Figura 27. Mas, as temperaturas que obtiveram destaque nos pontos de localização dos cafeeiros, quando utilizado o processo de normalização, concentram-se entre 19 e 21°C, conforme Figura 28. Esta informação é semelhante às faixas indicadas por Matiello et al. (2002), que definem como áreas aptas para plantio do café arábica as que estão entre 19 e 22°C. Também foi possível observar uma considerável presença do café entre as temperaturas de 22 a 25°C. Tais informações indicam a presença de conilon (*coffea canephora*) na região, visto que Matiello et al. (2002), determinaram como áreas aptas para plantio do café conilon aquelas que estão entre 22 e 26°C. A relevante ocorrência do conilon na bacia procede, dada a presença dos municípios de Cachoeiro de Itapemirim, Castelo, Jerônimo Monteiro, Muqui, Alegre e Atilio Vivacqua citados pelo censo agropecuário de 2006 como alguns dos produtores desta cultura ao sul do Espírito Santo, sendo ainda os dois primeiros citados pelo CETCAF (2002), como municípios com área de ocupação de café conilon entre 6 a 10 mil hectares.

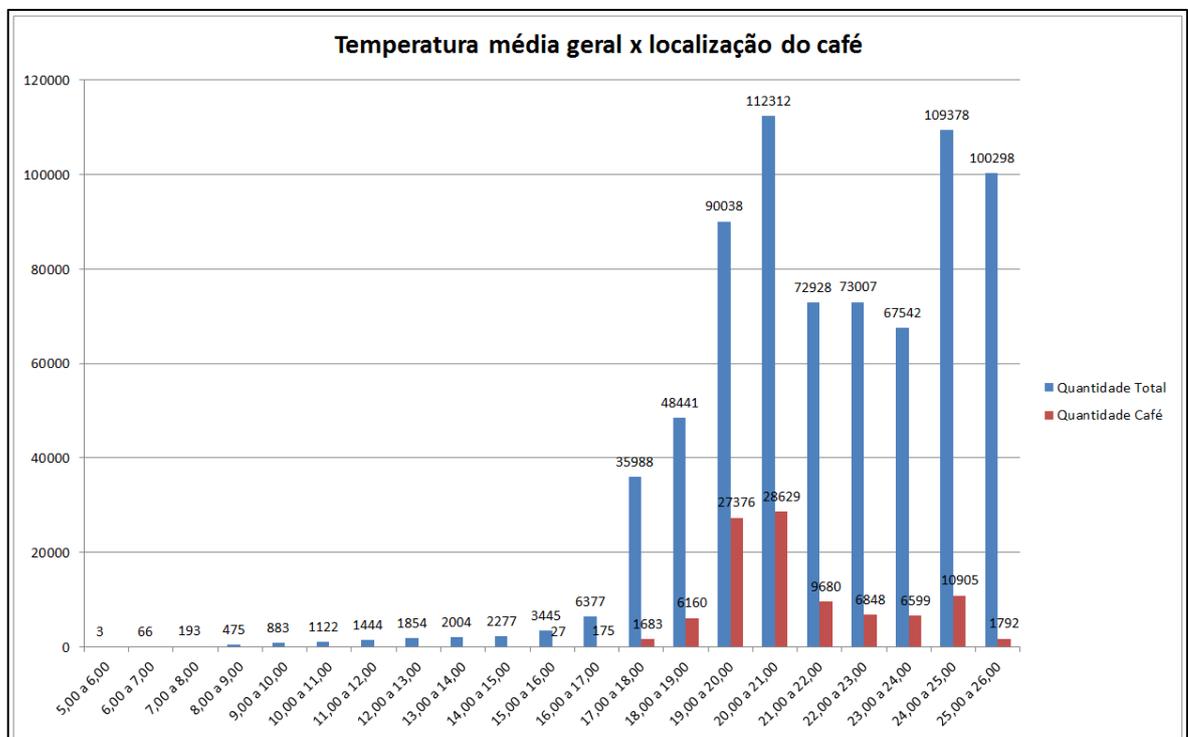


Figura 27. Temperaturas médias para todos os pixels da área de estudo, versus temperaturas médias nos pixels de ocorrência do café. Os valores concentram-se em grande parte de 17 e 26°C, com destaque para 19 a 21°C e 24 a 26°C.

No tocante às temperaturas máximas o café teve maior destaque quando realizada a normalização dos dados, nas faixas onde os valores estão entre 21 e 24°C, seguidas de um intervalo menos proeminente (mas ainda assim considerável), com temperaturas entre 24 e 28°C, o que reforça novamente a indicação de presença do conilon na área de estudo, bem como a possibilidade deste ser de um intervalo de transição entre as duas culturas, visto que segundo Matiello et al., 2002, para o café arábica a faixa de 23°C é restrita e a partir de 24°C já é considerada inadequada. Todavia, por se tratar de temperaturas máximas ocorridas em algum (ou alguns), dos meses durante o ano (e não das médias anuais), estas ainda podem ser consideradas como área de transição conforme se observa por meio da Figura 29.

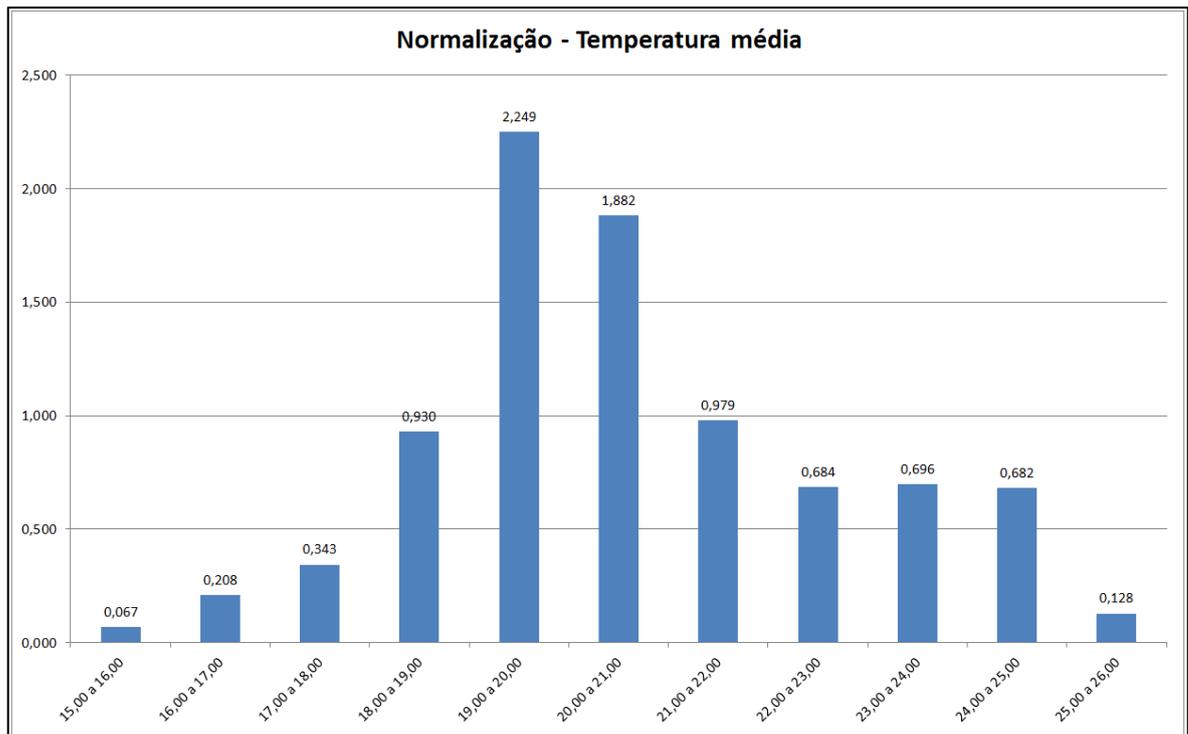


Figura 28. Normalização das temperaturas médias para todos os pixels de ocorrência do café em função dos pixels totais da área de estudo. Os resultados apresentaram as classes de 19 a 21°C como preferenciais para o café.

Com relação às temperaturas mínimas a faixa de destaque ocorre entre 15 e 18°C, sendo observada também uma faixa de menor destaque entre 18 e 22°C indicando, possivelmente, um intervalo de temperatura transitório entre o arábica e conilon conforme Figura 30.

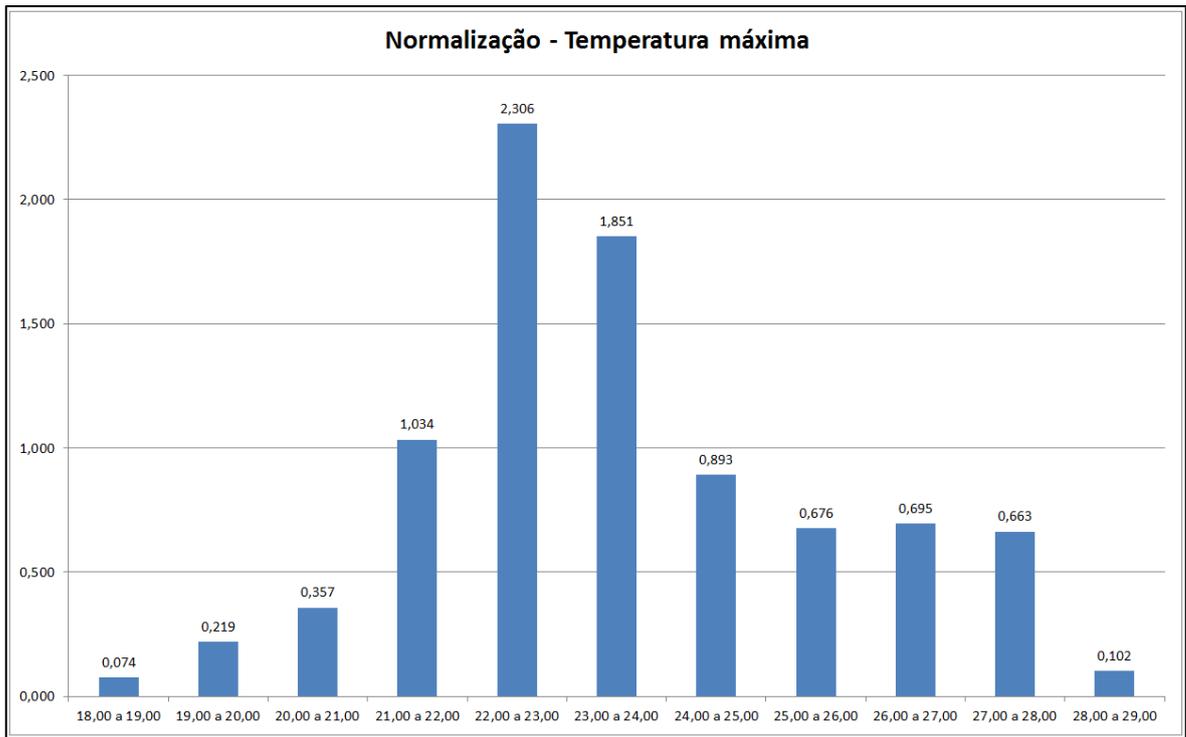


Figura 29. Normalização das temperaturas máximas para todos os pixels de ocorrência do café em função dos pixels totais da área de estudo. Os intervalos de 21 a 24°C indicam as máximas preferenciais para o café na área de estudo.

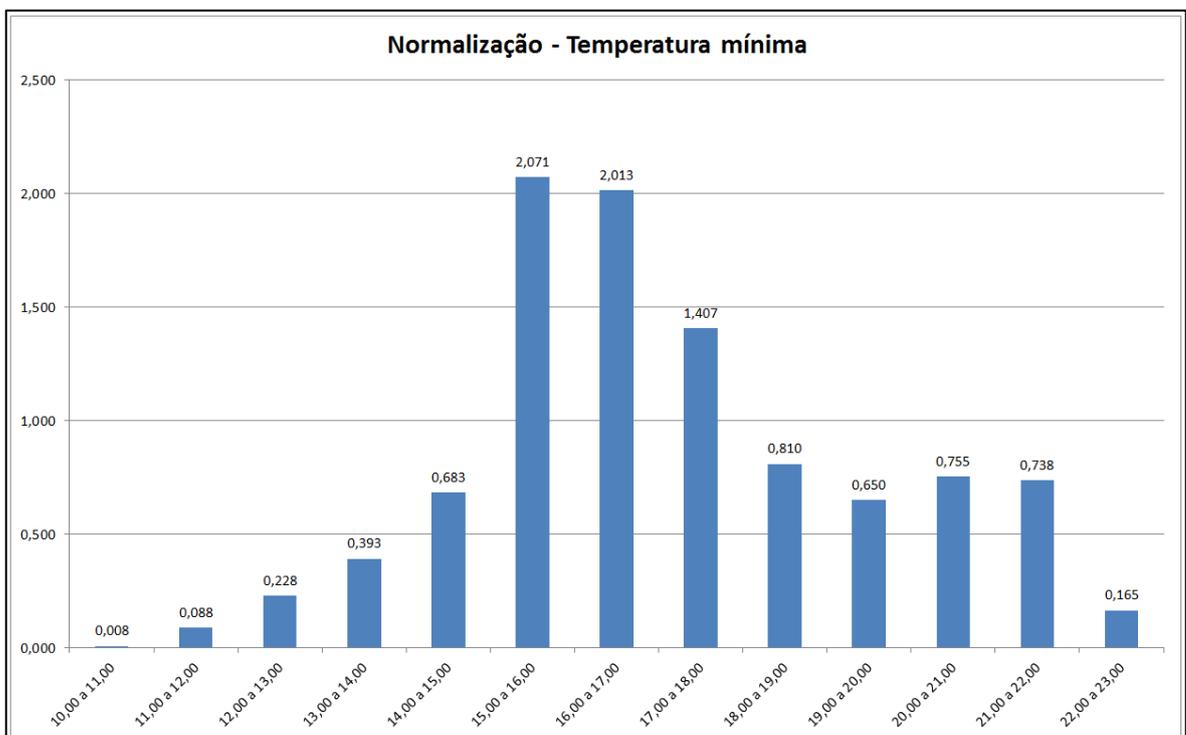


Figura 30. Normalização das temperaturas mínimas para todos os pixels de ocorrência do café em função dos pixels totais da área de estudo. Os intervalos de 15 a 18°C indicam as mínimas preferenciais para o café na área de estudo.

4.6.1 Mapas de deficiência hídrica para o café

Foi possível observar que durante os meses do ano, no intervalo de janeiro a dezembro, o maior valor de deficiência hídrica mensal obtido nos pontos de ocorrência do café para a bacia hidrográfica do rio Itapemirim foi de 44,89 mm, sendo o maior valor para deficiência hídrica média anual igual a 19,09 mm. A deficiência hídrica mínima do período entre janeiro a dezembro foi de 0mm (zero). Já o mapa de somatórios das deficiências hídricas considerado uma importante variável na identificação dos locais propícios ao desenvolvimento cultura do café, e que possibilitará indicar a aptidão do ponto/pixel com relação a este parâmetro para a cultura estudada, apontou 229,09 mm como o maior valor obtido, compreendendo a classe de valores entre 220mm e 240mm. Os resultados observados para deficiência hídrica na área de estudo são apresentados por meio da Figura 31.

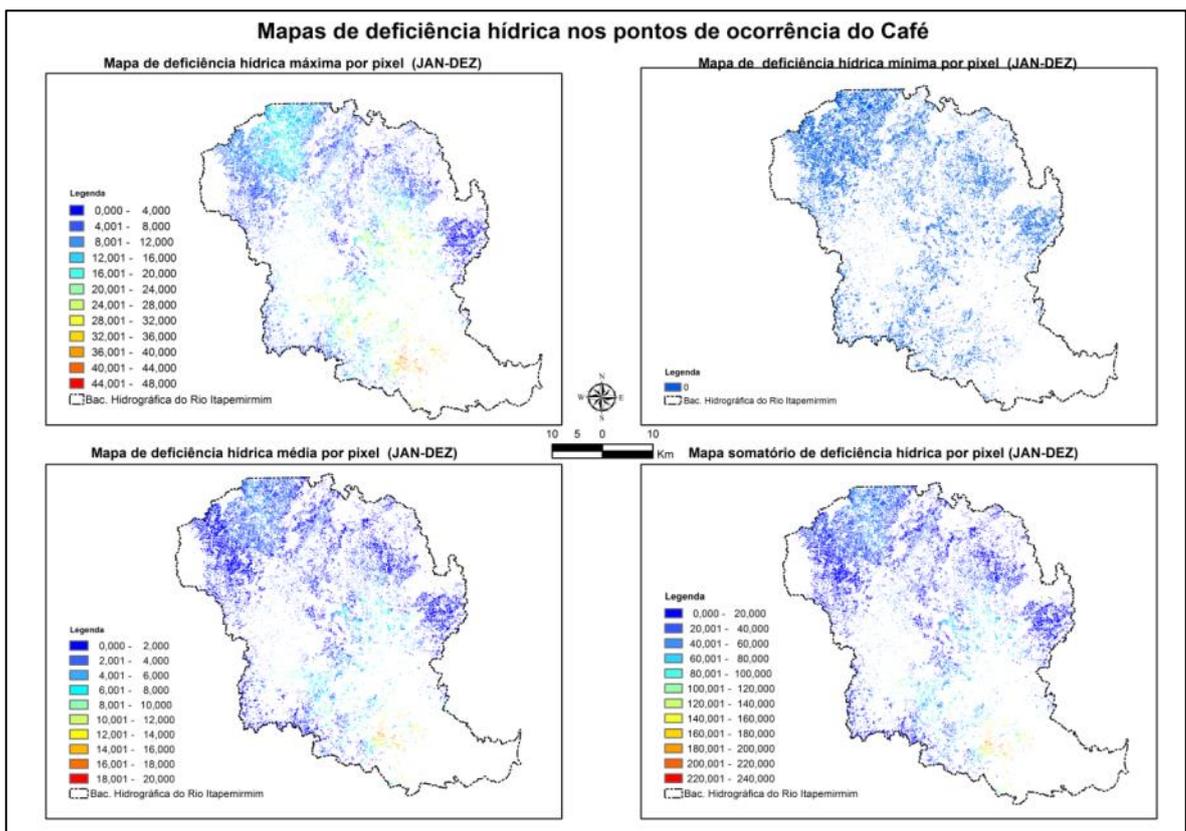


Figura 31. Valores máximos, médios e mínimos anuais além do somatório de todos os valores mensais para deficiência hídrica nos pixels de ocorrência do café.

Concernente à deficiência hídrica, Matiello et al. (2002) e Santinato et al. (2008), estabeleceram como valores aptos para a cultura do café arábica aqueles de até 100 mm anuais (sem irrigação), e 150 mm anuais (com irrigação ocasional), além dos valores para conilon como sendo de até 150 mm anuais (sem irrigação), e 200 mm anuais (com irrigação ocasional). No estudo, foi possível identificar que cerca de 84,59% da área total da bacia hidrográfica do rio Itapemirim encontra-se na faixa 0 a 96 mm conforme Figura 32. Tais valores indicam que esta é uma área de excelente aptidão hídrica para a cultura do café, atendendo em grande parte de sua extensão as faixas recomendadas para o cafeeiro tanto da espécie arábica quanto da espécie conilon.

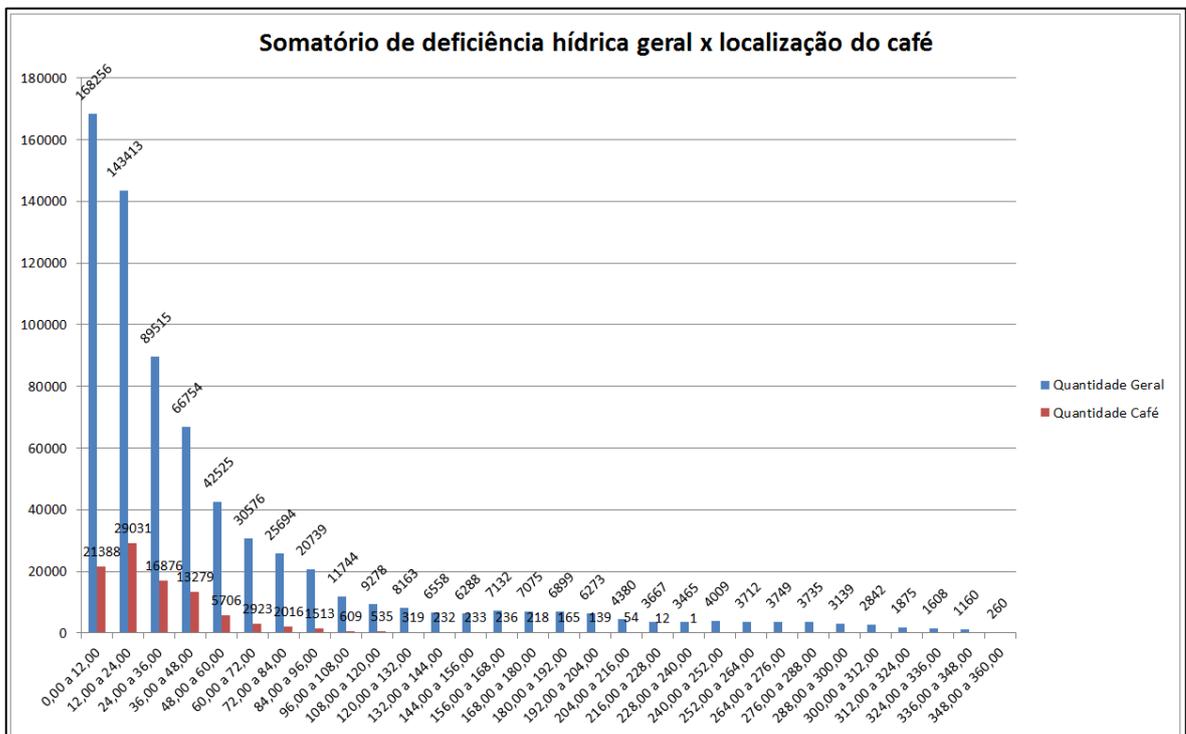


Figura 32. Somatório de deficiência hídrica para todos os pixels de ocorrência do café em função dos pixels totais da área de estudo. As classes mais proeminentes estão entre 0 e 72 mm de deficiência hídrica.

Dentre os valores encontrados para a bacia em estudo apenas 10,26% da área possui valores acima de 150 mm de deficiência hídrica, e verificou-se ainda, que estes valores ocorrem apenas nos municípios de Itapemirim, Atílio Vivácqua e em alguns pontos isolados de Presidente Kennedy, notoriamente áreas de predominância do café conilon.

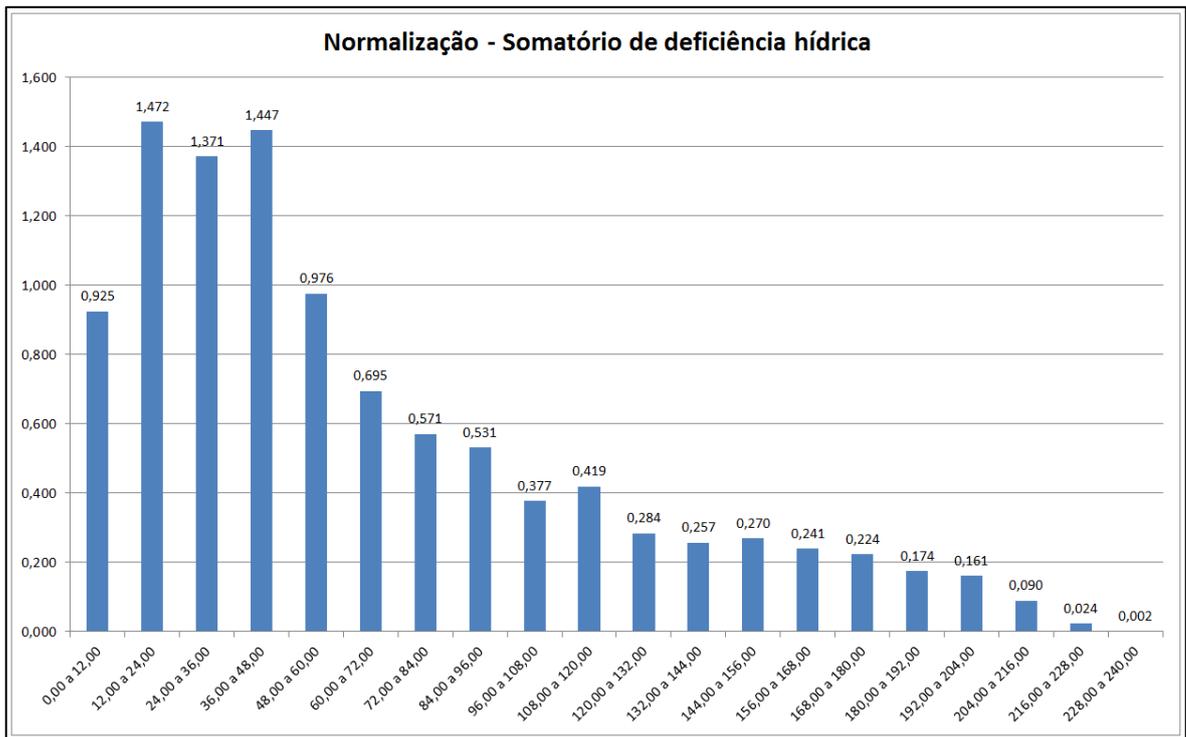


Figura 33. Somatório de deficiência hídrica normalizado para todos os pixels de ocorrência do café em função dos pixels totais da área de estudo. Os intervalos até 48 mm foram os preferenciais para a cultura do café na área de estudo.

Com relação à deficiência hídrica, o processo de normalização apresentado na Figura 33 apontou como valores preferenciais os que ocorrem entre 12 e 48 mm, indicando uma maior predominância no plantio do café nestas áreas. CAMARGO (1977), utilizando-se de análises em balanços hídricos para diversas regiões de cultivo do café, indicou como sendo áreas aptas às necessidades do arábica sem irrigação, as regiões com deficiência hídrica anual inferior a 150mm. BRASIL (2011), também considera como faixas aptas referentes às características hídricas para a cultura do café arábica no Espírito Santo, aquelas onde a deficiência hídrica é menor que 150 mm. Porém, Matiello (1991), Matiello et al. (2002) e Santinato et al. (2008), são mais restritivos e consideram como faixa apta sem irrigação somente aquelas com até 100 mm. Os valores observados no gráfico possibilitaram identificar as áreas preferenciais para a bacia em estudo como sendo aquelas de até 48mm anuais de deficiência hídrica, pois acima deste valor pode-se observar tal preferência em queda conforme os intervalos se afastam da faixa principal supracitada, até se tornarem praticamente nulos quando acima de 230 mm. Tal comportamento pode indicar

ser este, um valor praticamente limítrofe para o plantio da cultura do café na área em estudo.

Para os valores máximos de deficiência hídrica encontrados nas áreas onde há ocorrência do café, a normalização apontou como destaque as faixas de valores com até 18mm para os meses com maiores deficiências hídricas encontradas, destacando-se aqui, principalmente os meses de maio a setembro, considerados como meses secos. Os valores de deficiência hídrica máxima podem ser observados por meio da Figura 34. Concluindo, os gráficos para valores mínimos não foram plotados, pois todos os valores foram iguais a 0 (zero), compreendendo somente uma classe em comparação com os outros gráficos apresentados, e para todos os efeitos, seriam valores de deficiência hídrica considerados plenamente satisfatórios para a cultura do café.

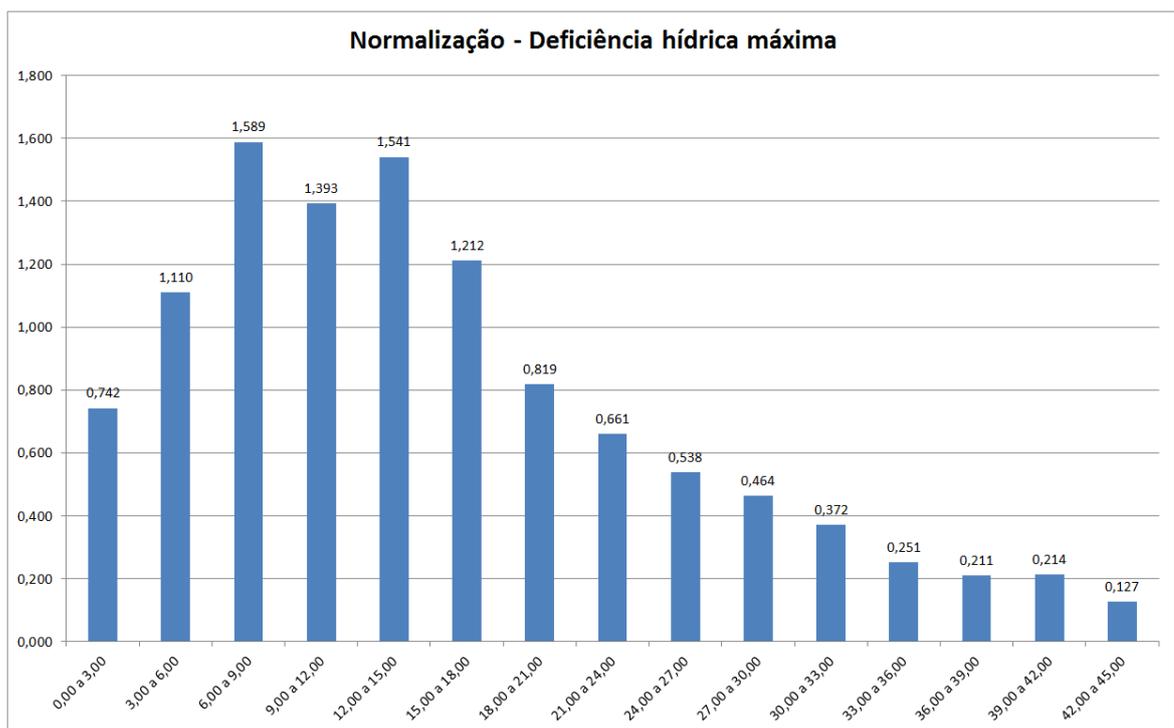


Figura 34. Deficiência hídrica máxima mensal e normalizada para todos os pixels de ocorrência do café em função dos pixels totais da área de estudo. Os valores preferenciais ocorreram entre 3 e 18mm de deficiência hídrica.

4.6.2 Mapas de altitude para o café

Desconsiderando-se eventos extremos, a altitude é uma variável que praticamente não sofre variação ao longo do tempo, e portanto, pode ser

observada de modo pontual em uma relação atemporal para a maioria dos casos. Na área de estudo, os municípios com maiores altitudes são Ibitirama, Lúna, Ibatiba, Muniz Freire, Conceição do Castelo, Vargem Alta e Venda Nova do Imigrante, destacando-se Ibitirama e Lúna (municípios onde está localizado o Caparaó), com altitudes que chegam a 2.854 metros, além do município de Castelo, com altitudes que chegam a 1989 metros.

Foi possível observar que as altitudes mais frequentes para a bacia hidrográfica do rio Itapemirim encontram-se distribuídas em duas principais faixas que vão de 0 a 180 metros e 660 a 900 metros. As duas faixas destacadas, respondem por cerca de 49,84% da área onde há ocorrência do café, que por sua vez incide efetivamente de 13 a 1538 metros. Observa-se ainda que, em alguns locais, o café é plantado em altitudes muito elevadas, como por exemplo, zonas acima dos 1300 metros. Entretanto, o montante deste quantitativo representa cerca de 0,13% do total observado e provavelmente ocorre devido a características bastante peculiares. O gráfico de altitude geral x localização do café pode ser observado por meio da Figura 35.

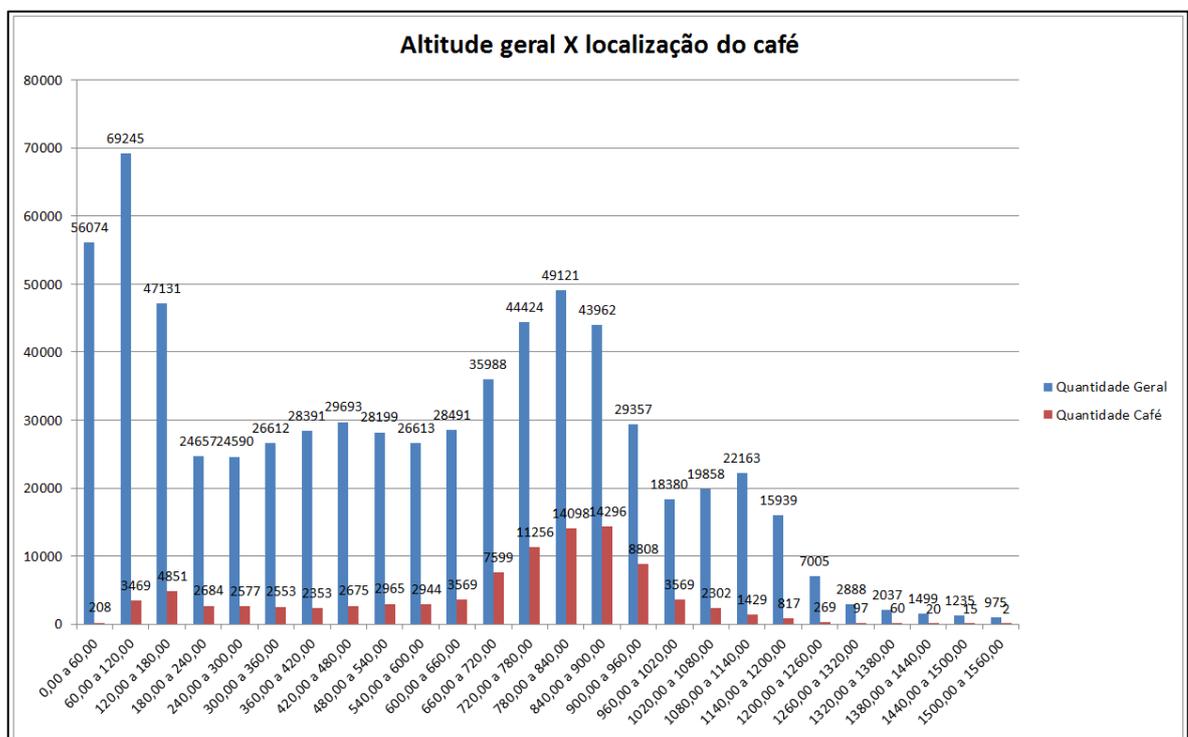


Figura 35. Gráfico de altitude geral x localização do café para todos os pixels de ocorrência do café em função dos pixels totais da área de estudo. As faixas com maior destaque foram as de 0 a 180 metros e 660 a 900 metros.

Realizado o processo de normalização dos dados, identificou-se que a maior parte do café plantado na área de estudo encontra-se na faixa entre 660 e 1020 metros. Esta faixa corresponde a cerca de 31,87% do total da área de estudo, mas, ela compreende 62,45% da área de plantio do café na bacia hidrográfica do rio Itapemirim. Outra faixa relevante para o plantio da cultura foi a que ocorreu de 0 a 660 metros de altitude, abrangendo a 56,14% da área de estudo, mas responsável apenas por 32,31% da área de plantio do café. Em terceiro lugar tem a faixa que vai de 1020 a 1320 metros, compreendendo 9,78% da área total e 5,15% da área com plantio de café, e concluindo, tem-se a faixa que vai de 1320 a 1560 metros, responsável por 0,83% da área total e correspondendo a 0,10% do plantio de café conforme Figura 36.

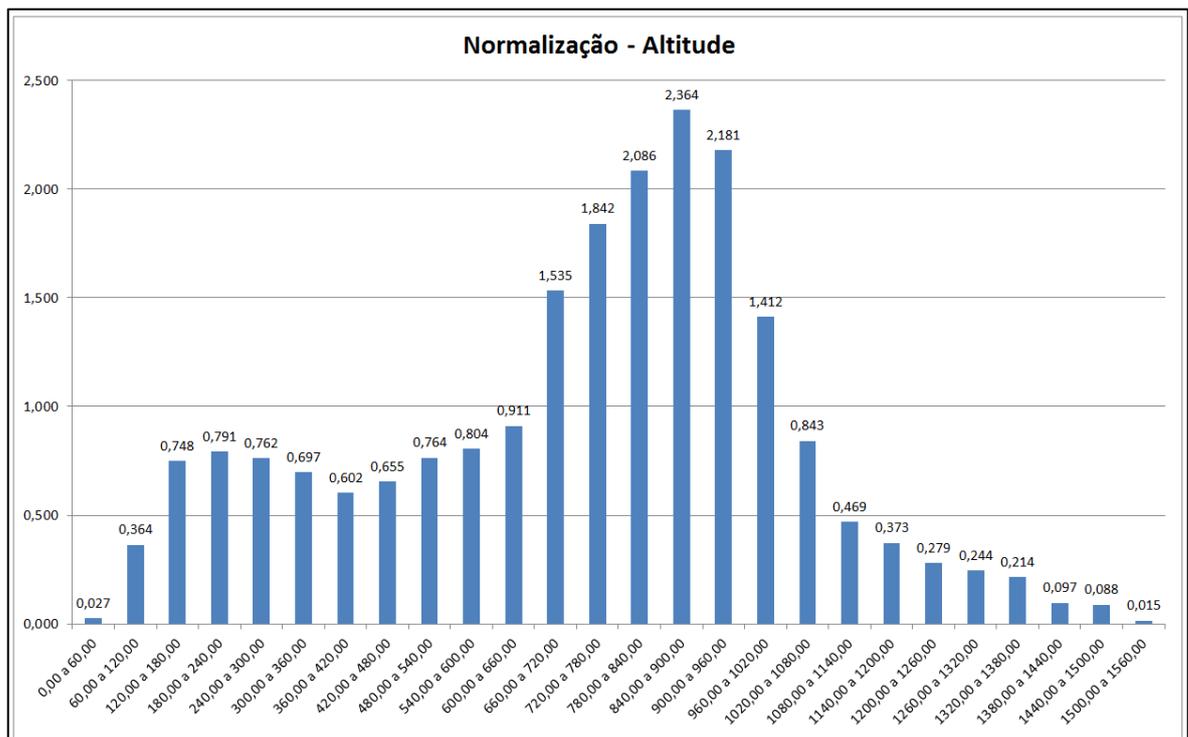


Figura 36. Gráfico de altitude normalizado para todos os pixels de ocorrência do café em função dos pixels totais da área de estudo. As altitudes entre 660 e 1020 foram as preferenciais para o café na área de estudo.

É importante observar que a faixa entre 600 e 660 metros apresenta-se em uma aparente zona de transição para o café, com temperaturas próximas de 21,2 a 21,6°C, e, provável zona de início de restrições para a cultura. Com base nos dados da literatura, estas áreas ainda seriam propícias ao plantio do café

arábica, mas restritas ao café conilon. Também foi possível observar que o café ocorreu em classes de altitudes superiores aos 1300 metros, mas tal fato foi observado somente em regiões específicas que compreendem as divisas dos municípios de Muniz Freire com Iúna, Muniz Freire com Ibatiba e Ibatiba com Irupi. Além disso, estas faixas compreendem temperaturas que oscilam entre 15 e 17°C, e como supracitado correspondem apenas a 0,13% dos pontos de ocorrência do café na área de estudo. As análises para altitude podem ser observadas por meio da Figura 37.

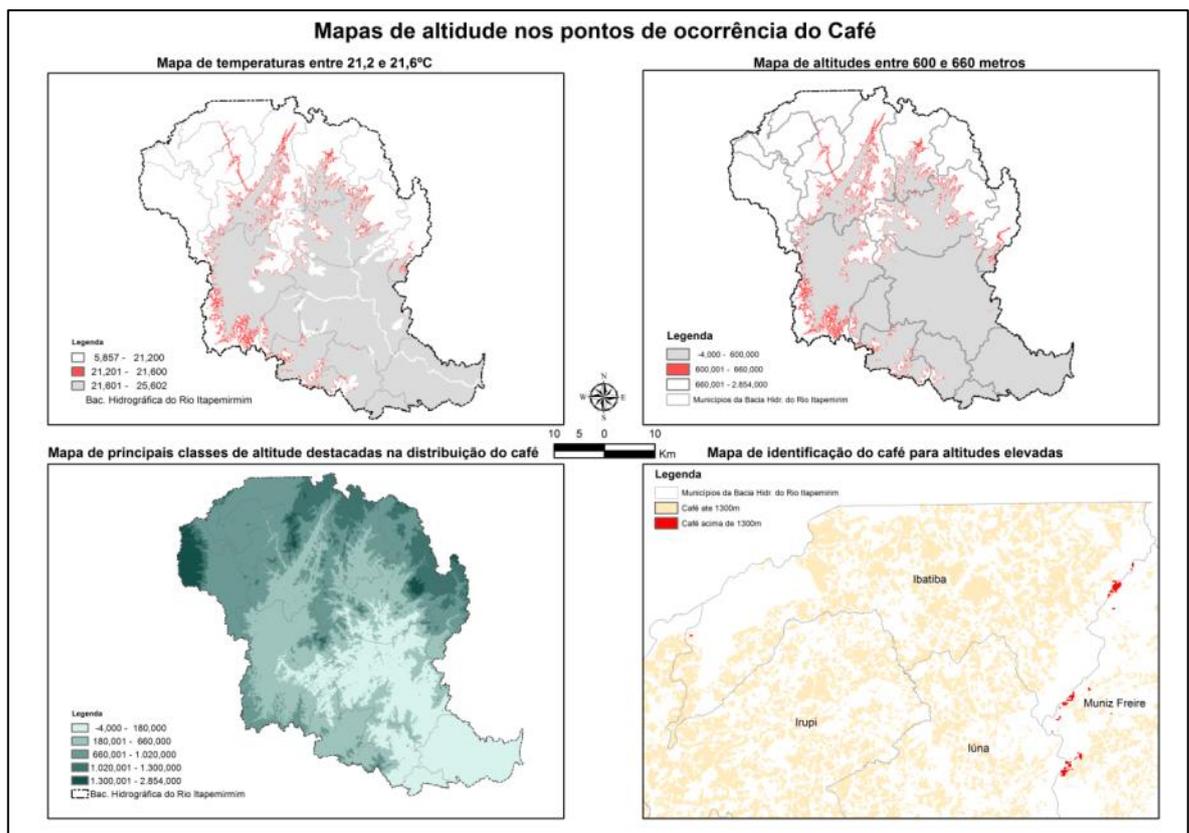


Figura 37. Identificação de importantes altitudes na distribuição do café para a área de estudo.

4.6.3 Mapas de déficit de evapotranspiração relativa para o café

Conforme definido por DOORENBOS & KASSAM (1994), o déficit de evapotranspiração relativa expressa a magnitude e duração do déficit hídrico, que está estreitamente correlacionado com o rendimento da cultura. A relação

indica que, quanto maior o valor desse parâmetro (medido entre 0 e 1), maior será a queda na produção, e quanto mais próximo de zero, mais baixas as restrições por déficit de evapotranspiração relativa.

Com relação ao déficit de evapotranspiração relativa, foi possível observar que os valores mais frequentes para a bacia hidrográfica do rio Itapemirim encontram-se de 0 a 0,06 e que ocupam cerca de 80,66% da área em estudo, sendo responsáveis por 94,81% do café produzido. Por meio dos resultados e a sua proximidade de zero, é possível inferir que a área de estudo é uma região de baixa perda de produção (cerca de 6% em sua maior parte), no que diz respeito ao parâmetro analisado.

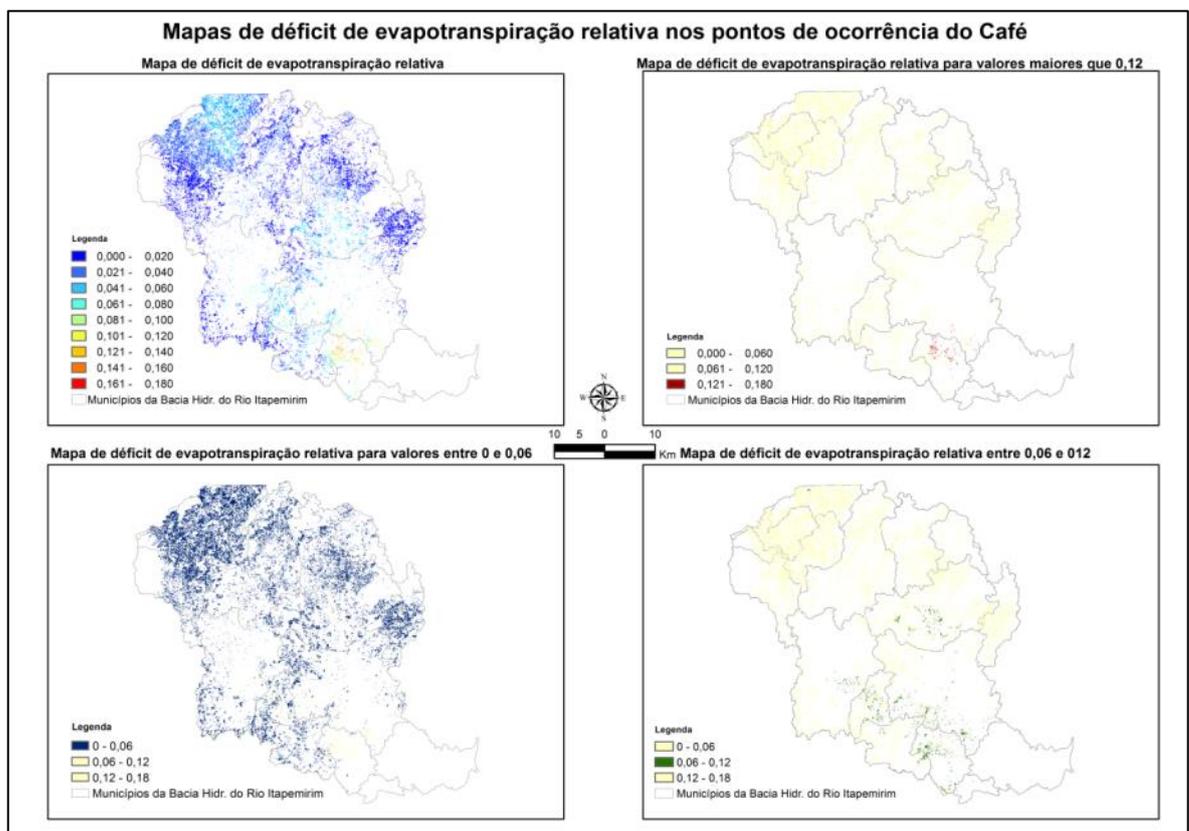


Figura 38. Principais classes em destaque para o déficit de evapotranspiração relativa do café na área de estudo. Destacando-se que quanto mais próximo de 0 (zero), menores as restrições por déficit de evapotranspiração relativa.

Foi possível observar também, que os maiores valores para o déficit de evapotranspiração relativa ocorreram para os municípios de Cachoeiro de Itapemirim, Atilio Vivácqua e Presidente Kennedy, municípios nos quais foram

obtidos valores maiores que 0,12. Os valores intermediários entre 0,06 e 0,12 foram observados principalmente nos municípios de Castelo, Cachoeiro de Itapemirim, Atílio Vivácqua, Alegre, Jerônimo Monteiro e Muqui. Os resultados podem ser verificados por meio da Figura 38 e Figura 39.

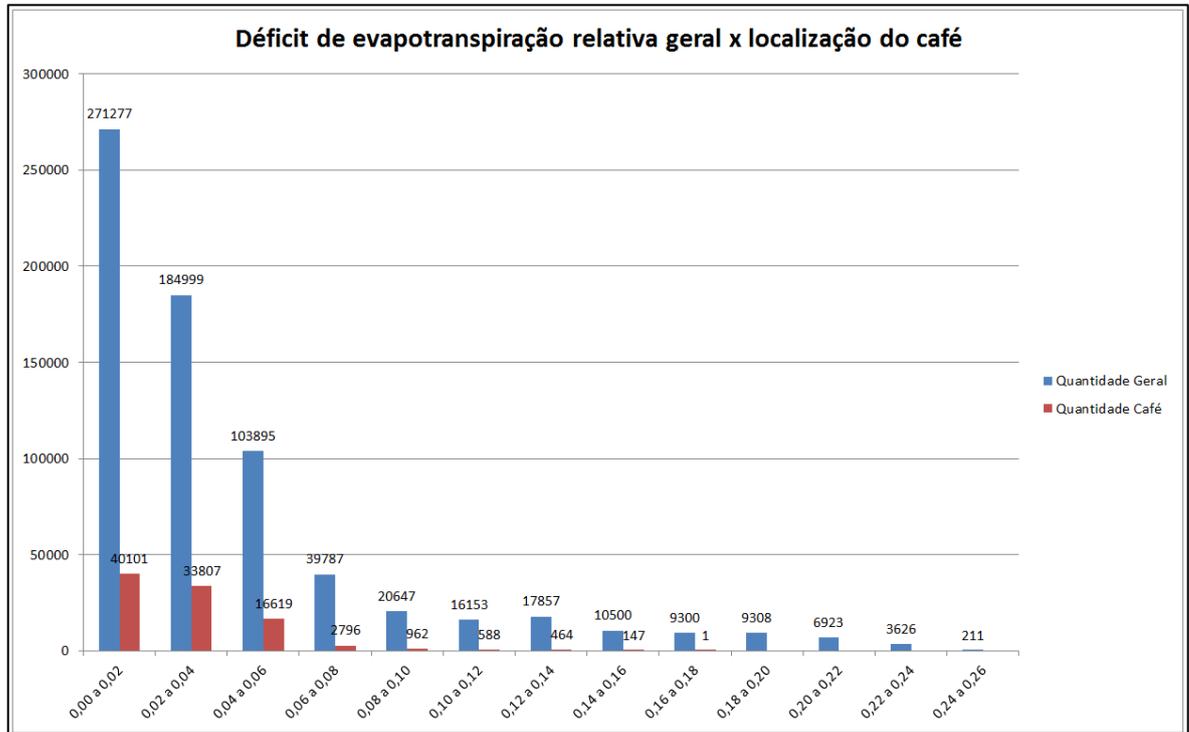


Figura 39. Identificação das ocorrências preferenciais para o déficit de evapotranspiração relativa nos pontos de localização do café para a área de estudo.

Realizado o processo de normalização dos dados, identificou-se que a maior parte do café plantado na bacia hidrográfica do rio Itapemirim, também ocorre preferencialmente na faixa de 0 a 0,06, indicando que nas áreas preferenciais pode-se inferir uma perda máxima de apenas 6% de produção. Tais características reforçam a condição favorável para o plantio do café nestas condições para a região analisada. Os resultados da normalização podem ser observados por meio da Figura 40.

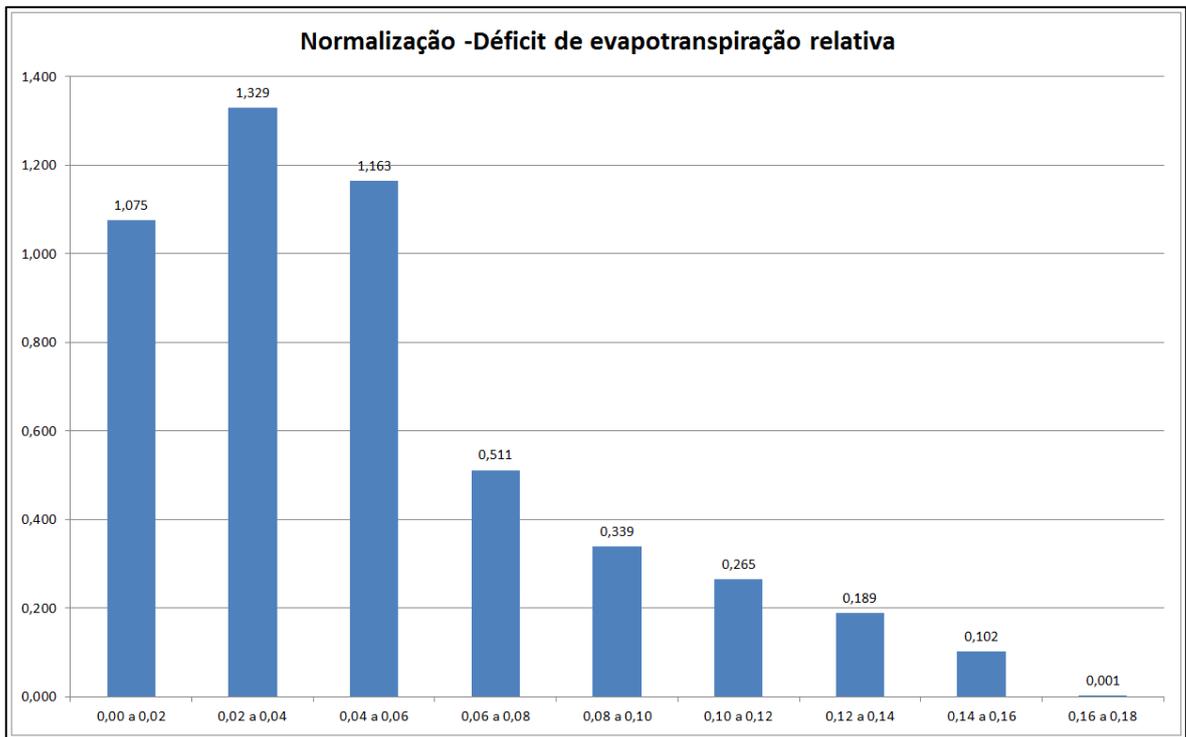


Figura 40. Gráfico de déficit de evapotranspiração relativa normalizado para todos os pixels de ocorrência do café em função dos pixels totais da área de estudo. Os resultados preferencias foram observados entre 0 e 0,06.

4.7 Mapas de valores preferenciais versus valores aptos apresentados na literatura e zoneamento para o café arábica

Concluindo, observou-se que as classes de valores obtidas como preferenciais anteriormente apresentadas, possuem intervalos semelhantes aos alcançados na literatura referentes ao café da espécie arábica. Assim, foram contrastadas as áreas obtidas como aptas por meio da literatura com as áreas preferenciais observadas nos resultados da pesquisa, vislumbrando identificar as semelhanças mais proeminentes entre as áreas examinadas.

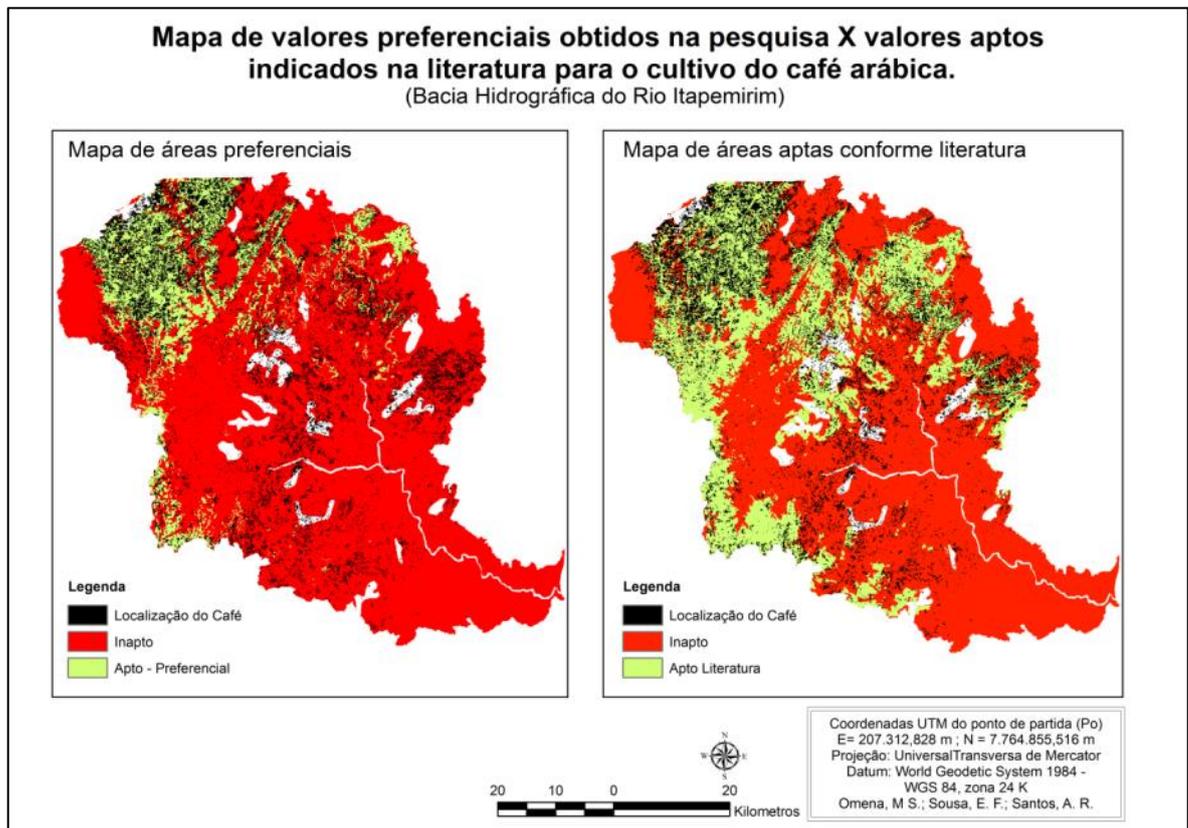


Figura 41. Mapa de valores preferenciais obtidos por meio das análises resultantes deste trabalho, versus valores apresentados na literatura como aptos para a cultura do café arábica. As áreas indicadas pelas faixas preferenciais apresentaram maior concentração de café, enquanto nas áreas recomendadas pela literatura, observa-se uma localização mais dispersa da cultura.

Por meio da combinação dos parâmetros de altitude, deficiência hídrica e temperatura, foram obtidos os resultados apresentados na Figura 41, onde se verifica um menor distanciamento entre os pontos com presença do café arábica

nas áreas em verde destacadas no mapa de áreas preferenciais (a esquerda), quando comparado ao mapa de áreas aptas segundo a literatura (a direita), onde se constata maior dispersão dos pontos e menor sobreposição das áreas aptas, com localização do café enfatizadas pela cor preta.

Obtidos os resultados supracitados, os dados foram correlacionados ponto a ponto e analisadas as relações entre as áreas identificadas. Foi possível constatar conforme se verifica na Tabela 15, que as áreas consideradas como preferenciais totalizaram 94.260,51 hectares, e que deste montante, foram obtidos 30.645,54 hectares (32,51%) de áreas onde o café está localizado. Já para o mapa de áreas aptas segundo a literatura, verifica-se um total de 186952,86 hectares considerados propícios, sendo que desses, 43781,31 hectares (23,42%), correspondem a áreas onde o café está localizado. Assim, observa-se que na relação produtiva entre as duas áreas, que (quando comparadas), aquelas consideradas preferenciais são 38,83% mais produtivas do que as consideradas somente aptas.

Tabela 15: Comparações entre as áreas preferenciais obtidas por meio das análises realizadas na bacia hidrográfica do rio Itapemirim e os valores recomendados na literatura.

	Área – Preferencial		Área - Literatura	
	Hectares	(%)	Hectares	(%)
Total	94.260,51	100,00%	186.952,86	100,00%
Com café	30.645,54	32,51%	43.781,31	23,42%
Sem café	63.614,97	67,49%	143.171,55	76,58%

Por meio do mapa resultante, pode-se observar que as áreas com café indicadas em vermelho indicam provável presença de conilon, enquanto as áreas em amarelo representam as áreas de produção do arábica não preferenciais, e, portanto, as áreas em verde caracterizam as regiões identificadas como as de maior produção, sendo assim, as preferenciais para a área em estudo. Os resultados obtidos podem ser observados por meio da Figura 42.

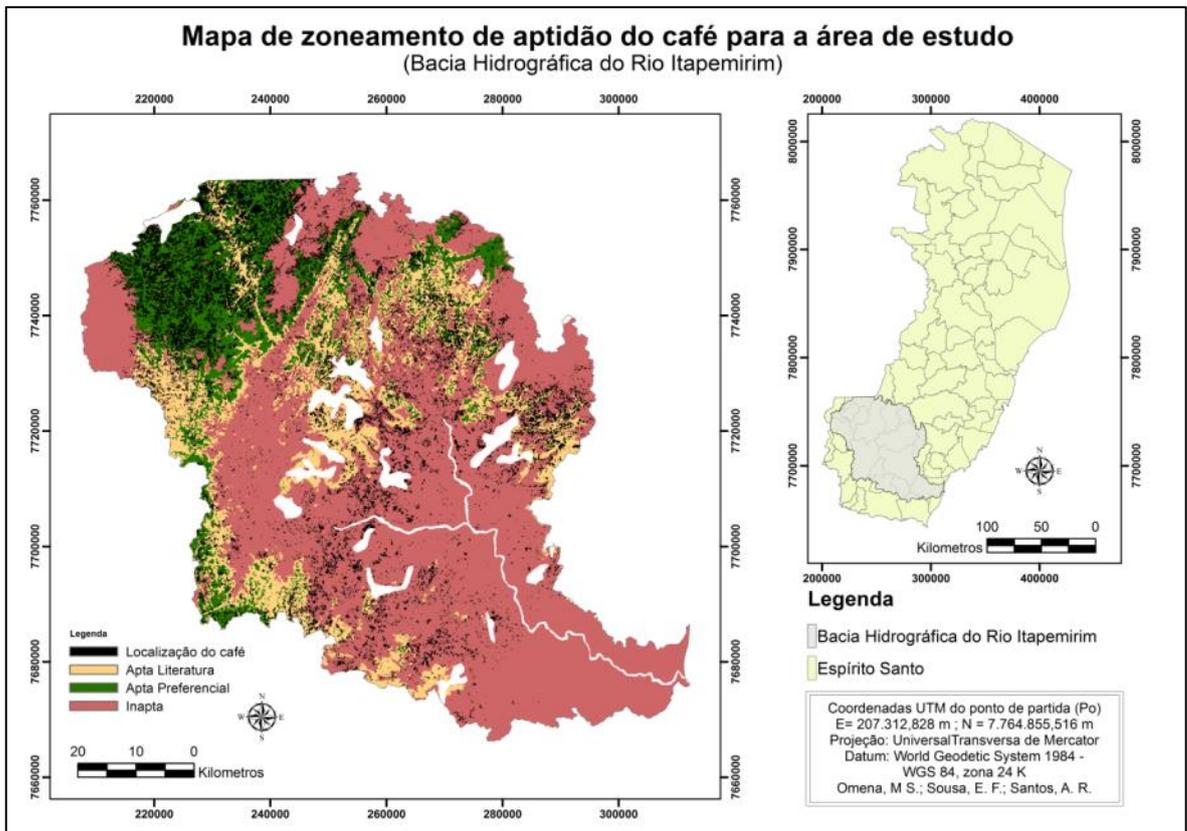


Figura 42. Mapa de zoneamento de aptidão do café arábica para a área de estudo considerando as faixas de aptidão preferenciais obtidas para a bacia hidrográfica do rio Itapemirim (verde), as faixas de aptidão recomendadas pela literatura (amarelo) e as faixas consideradas inaptas (vermelho).

5. CONCLUSÕES

Tendo em vista os resultados obtidos, pode-se concluir que para a bacia hidrográfica do rio Itapemirim, as faixas preferenciais para a cultura do café relativas à temperatura média estão entre 19 e 21°C. Entretanto, foi possível observar que em cerca de 85,77% da área de estudo, as temperaturas médias ocorrem entre 19 e 26°C, sendo este, um intervalo de temperaturas que possibilita tanto o plantio da espécie conilon (*coffea canephora*) quanto da espécie arábica (*coffea arabica*).

Os resultados obtidos para a bacia hidrográfica do rio Itapemirim, com relação às faixas preferenciais para a cultura do café no quesito deficiência hídrica anual, ocorreram entre 12 e 48 mm. Todavia, a região possui excelente aptidão hídrica, visto que cerca de 84,59% da área total da bacia encontra-se na faixa 0 a 96 mm, atendendo em grande parte de sua extensão, as faixas recomendadas para o cafeeiro, abrangendo valores preferenciais tanto para a espécie arábica quanto para a espécie conilon.

Com relação à altitude, os valores preferenciais para o café na bacia hidrográfica do rio Itapemirim estão entre 660 e 1020 metros, tais valores abrangem cerca de 31,87% da área de estudo e correspondem a 62,45% da área total de plantio do café. No entanto, novamente destaca-se a excelente aptidão da

bacia para o plantio da cultura, pois cerca de 88,02% de sua extensão compreende altitudes entre 0 e 1020 metros, abrangendo novamente as faixas recomendadas para as duas espécies supracitadas e contemplando 94,75% da área onde o café está localizado.

Com relação ao déficit de evapotranspiração relativa, foi possível observar que os valores mais frequentes para a bacia hidrográfica do rio Itapemirim encontram-se no intervalo de 0 a 0,06, ocupando cerca de 80,66% da área total e respondendo por cerca de 94,81% do café produzido. Os resultados indicam deste modo, baixas perdas de produção para o café na área estudada no que diz respeito a este parâmetro.

Sendo o balanço hídrico considerado um importante instrumento para análise do computo de entradas e saídas de água, e um indicador para o plantio de diversas culturas em uma dada região, e tendo ainda como base os resultados obtidos por meio do algoritmo desenvolvido (que alcançaram relevante acurácia nos cálculos de aferição), conclui-se que os resultados de processamento foram satisfatórios para o estudo desenvolvido.

Os procedimentos computacionais desenvolvidos possibilitaram os cálculos e as aferições para todos os cerca de 700 mil pixels na área de estudo com eficácia e precisão. Conclui-se assim, que os algoritmos aplicados possivelmente poderão ser utilizados para análises em todo estado do Espírito Santo e para outras regiões do Brasil na obtenção do balanço hídrico climatológico.

6. APÊNDICE

6.1 Mapas de aferições do balanço hídrico normal climatológico

Para medir a eficiência dos resultados, foram desenvolvidas rotinas de programação na linguagem Python, que possibilitam a conferência pixel a pixel dos cálculos utilizados para realização do balanço hídrico climatológico conforme a literatura. Assim, segundo SENTELHAS E ANGELOCCI (2012b), após a conclusão dos cálculos, a aferição do balanço hídrico climatológico deve ser verificada por meio das equações 21, 22, 23 e 24.

$$\sum P = \sum ETP + \sum (P - ETP) \quad (21)$$

$$\sum P = \sum ETR + \sum EXC \quad (22)$$

$$\sum ETP = \sum ETR + \sum DEF \quad (23)$$

$$\sum ALT = 0 \quad (24)$$

Entretanto, para obtenção de uma medida mais correlata entre os resultados, de forma que fosse possível mensurar de modo semelhante a precisão dos valores finais obtidos para todos os parâmetros, adaptaram as equações 21, 22 e 23 conforme as equações 25, 26 e 27, onde quanto mais próximos de zero o valor resultante para cada pixel, maior a precisão dos resultados.

$$0 = (\sum P) - (\sum ETP + \sum (P - ETP)) \quad (25)$$

$$0 = (\sum P) - (\sum ETR + \sum EXC) \quad (26)$$

$$0 = (\sum ETP) - (\sum ETR + \sum DEF) \quad (27)$$

Concluindo, é importante salientar que as planilhas normalmente utilizadas para a realização do balanço hídrico climatológico, consideram para efeito do cálculo, uma ou duas casas decimais. Entretanto, devido aos processos computacionais e às suas características, foi possível ampliar esta precisão, o que possibilitou avaliar e validar com maior acurácia e alto grau de exatidão os resultados obtidos.

6.1.1 Mapa de aferição com base no somatório da alteração

Os resultados para o mapa de aferição do somatório das alterações foram pertinentes e altamente precisos, variando entre $-0,000016212$ e $0,000015259$, o que demonstra o alto grau de confiabilidade obtido. O total de pontos/pixels observados foi de 729950 (setecentos e vinte e nove mil novecentos e cinquenta), destes, 590746 apresentaram resíduo final nulo (exatamente zero), 69359 apresentaram resíduo final negativo e 69845 apresentaram resíduo final positivo conforme pode ser observado por meio da Figura 43.

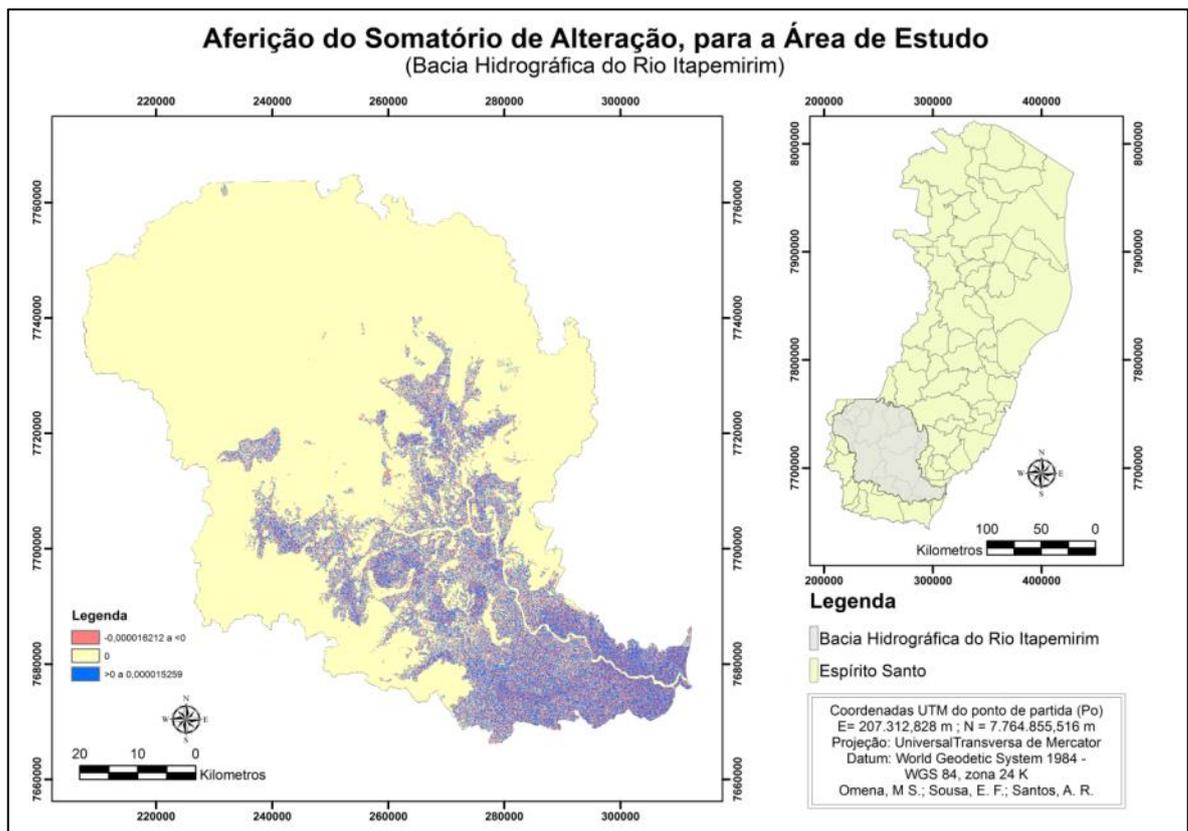


Figura 43: Mapa de aferição do somatório de alteração para todos os meses em todos os pontos da bacia hidrográfica do rio Itapemirim. Os resultados obtidos apresentaram alta precisão e pertinência.

6.1.2 Mapa de aferição entre precipitação e evapotranspiração.

O mapa obtido por meio deste processo de aferição refere-se à equação 25 previamente apresentada e resultou em nulidade de diferença entre os valores calculados, indicando um resultado perfeito do ponto de vista dos cálculos de processamento do balanço hídrico para esta aferição em todos os pixels envolvidos. O mapa evidencia a precisão dos resultados, visto que se apenas um pixel entre os aproximadamente 700 mil pontos multiplicados pelos 12 meses analisados resultasse em cálculo incorreto, o mapa não fecharia com a exatidão obtida (igual a zero em toda sua extensão). O mapa relativo à aferição obtida por meio da equação 25 pode ser observado na Figura 44.

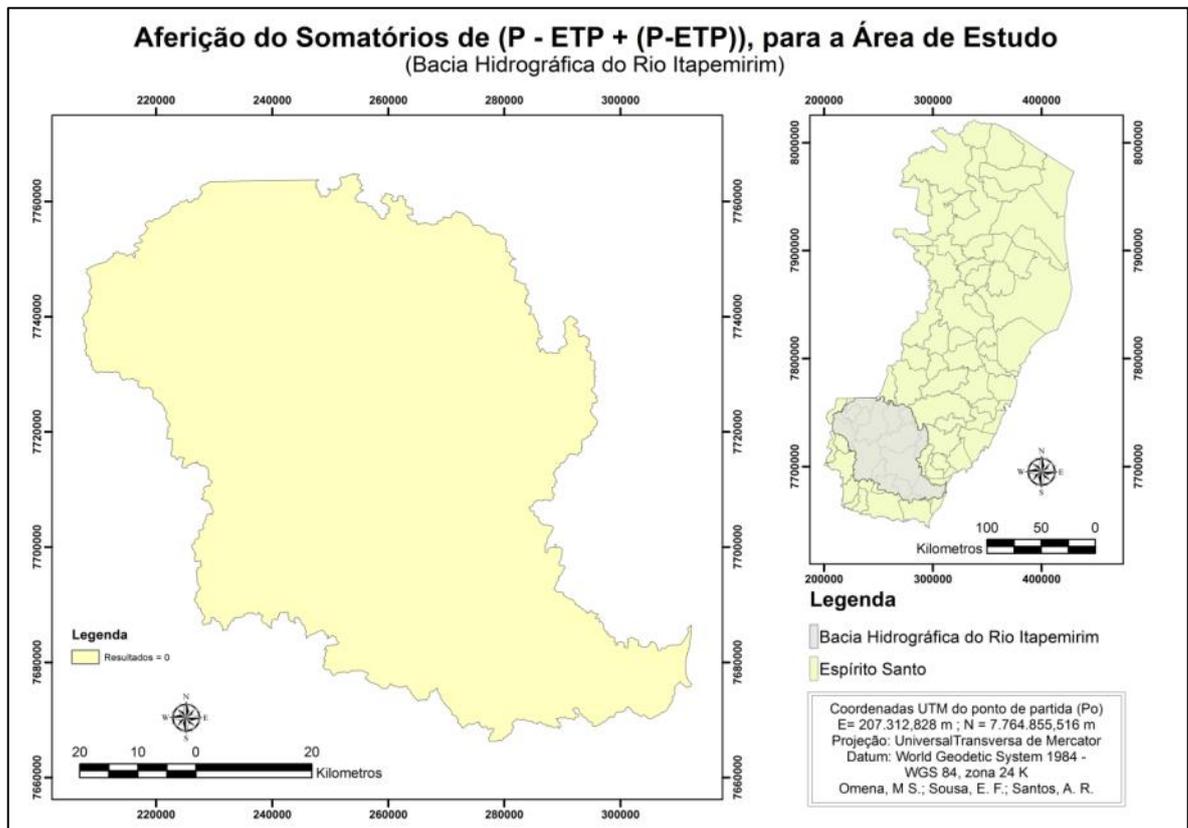


Figura 44. Mapa de aferição dos somatórios de P-ETP + (P-ETP), para a bacia hidrográfica do rio Itapemirim.

6.1.3 Mapa de aferição entre as variáveis de evapotranspiração potencial, evapotranspiração real e deficiência hídrica.

O mapa resultante deste processo de aferição refere-se à equação 27 previamente apresentada. Os resultados obtidos conforme Figura 45, demonstraram que 707040 pixels (96,86%), encontram-se na faixa central entre -0,000183105 a 0,000183105 (tercil central¹), 11522 pixels (1,58%), entre -0,000488281 a -0,000183105 e 11388 pixels (1,56%), entre 0,000183105 a 0,000488281, indicando uma boa distribuição central e um resultado com alto grau de precisão.

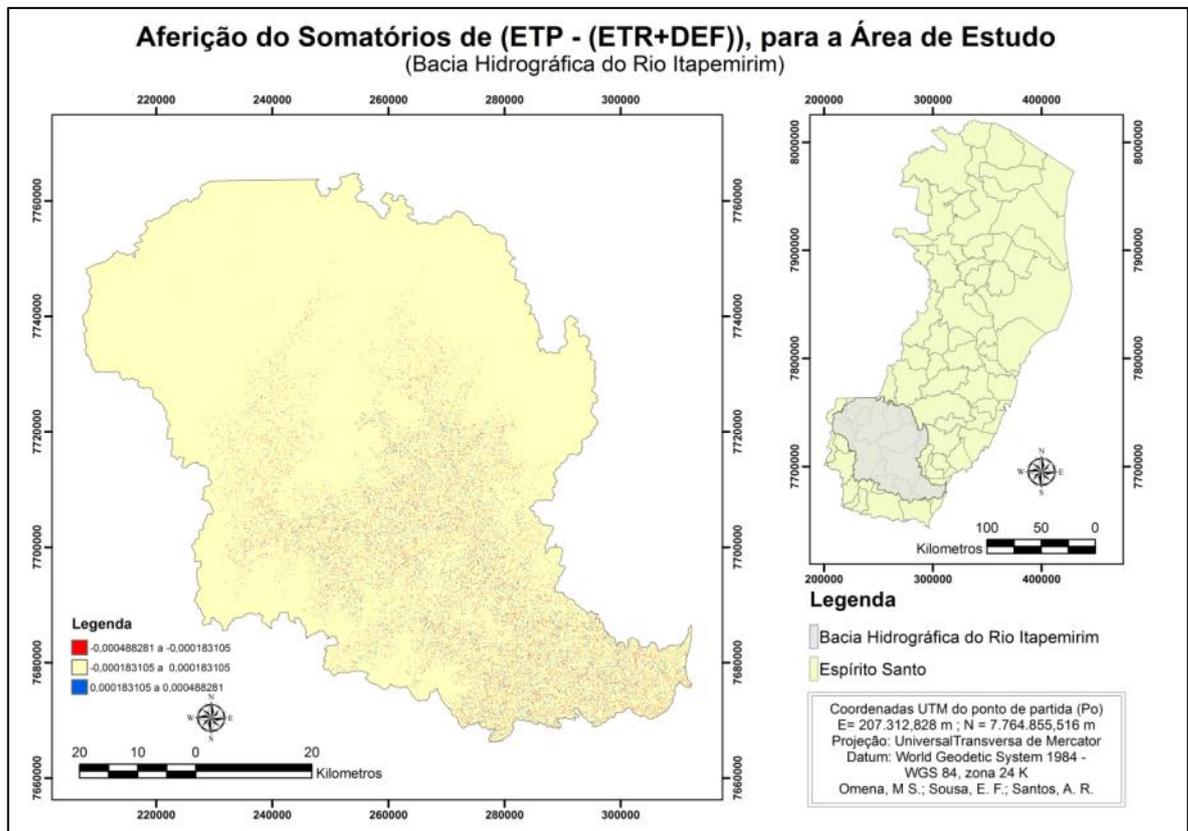


Figura 45. Aferição dos somatórios de evapotranspiração potencial menos evapotranspiração real mais deficiência hídrica para a bacia hidrográfica do rio Itapemirim.

¹ Separatriz estatística que divide a área de uma distribuição de frequência em domínios de áreas iguais a múltiplos de um terço da área total.

6.1.4 Mapa de aferição entre precipitação, evapotranspiração real e excedente hídrico.

Concluindo as etapas de conferência dos resultados, é apresentado o mapa obtido por meio do processo de aferição entre os somatórios de precipitação, evapotranspiração real e excedente hídrico (Figura 46), derivado da equação 26. Nele obteve-se quase a totalidade dos valores entre -0,000244141 e 0,000244141 contemplando 727287 pixels representando cerca de 99,64%. Os valores entre -0,029785156 a -0,000244141 compreendem 1945 pixels, correspondendo a 0,27% e os valores entre 0,000244141 a 0,000488281 compreendem 718 pixels, correspondendo a 0,1% ,do total.

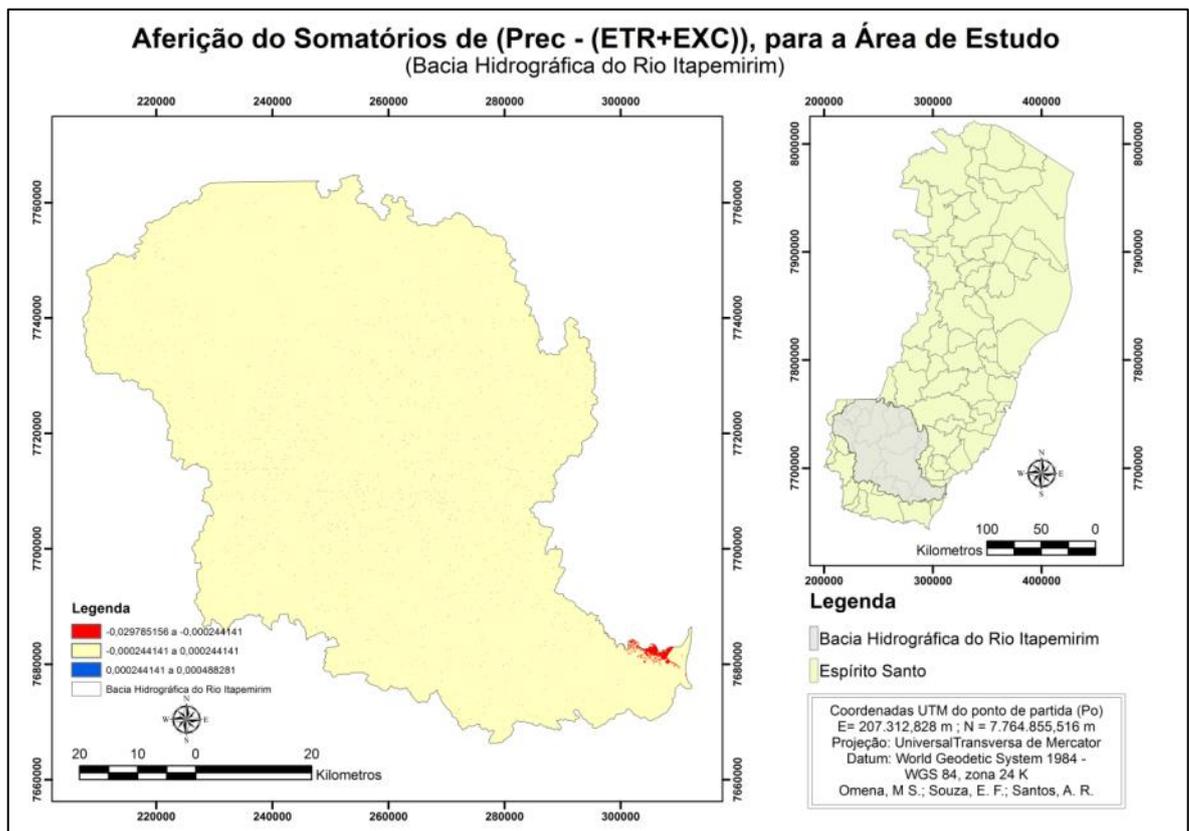


Figura 46. Mapa de aferição dos somatórios de precipitação menos evapotranspiração real mais excedente hídrico para a bacia hidrográfica do rio Itapemirim.

7. TRABALHOS FUTUROS

- a) Aplicação do algoritmo em diferentes áreas, visando à obtenção dos intervalos de ocorrência do café e às análises que possam indicar novas temperaturas preferenciais para a cultura.
- b) Aplicação do algoritmo em todo estado do Espírito Santo utilizando-se das médias de precipitações mensais, processadas inicialmente para cada mês (com base nos dias) e relativas a cada ano (interpolação individual para cada ano), e depois dividida pelo total de anos envolvidos (30 anos), resultando em uma média suavizada para o período.
- c) Realização de análises em subáreas com dados ASTER, possuindo 30 metros de resolução espacial, visto que o tempo de processamento necessário será consideravelmente maior (dada a melhor resolução). A título de comparação é importante informar que tem na área de estudo 700 mil pontos de 90 metros. E com os dados ASTER, teria este valor multiplicado por 9, o que daria um total aproximado de 6.300.000 (6,3 milhões de pontos), aumentando a complexidade dos testes e resultados a serem obtidos na área de estudo.
- d) Análise de fluxo de água utilizando o ArcGIS e ambientes virtuais tridimensionais (AVA3D), fazendo recortes a 255 metros e

movimentando a altura da água para análises dos locais mais atingidos (análise tridimensional em ambiente virtual).

- e) Verificação pormenorizada do código visando aumentar a otimização estrutural do código e redução do tempo de processamento do algoritmo computacional que em sua totalidade possui tempo médio de execução de 4 horas.
- f) Aplicação de outros métodos de balanço hídrico normal climatológico para realizar a comparação com o que foi abordado neste trabalho.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABID – Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem. **O que é Evapotranspiração Máxima e Evapotranspiração Real**. Disponível em: <<http://www.abid.org.br/kc/real.html>> Acesso em 15 set 2014.

AEES - Governo do Estado do Espírito Santo. "**Atlas de Ecossistemas do Espírito Santo**", 2008. Disponível em CD.

ALMEIDA, A. Q. de; RIBEIRO, A.; PAIVA, Y. G.; RASCON, N. J. L.; LIMA, E. P.; **Geoestatística no estudo de modelagem temporal da precipitação**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.15, n.4, p.354–358, 2011.

ANA – Agência Nacional de Águas - **Sistema de Informações Hidrológicas Hidroweb** – Dados on Line. Disponível em: < <http://hidroweb.ana.gov.br/>> Acesso em: 08 Mar. 2014.

BRAGA, R. M; THALES, M. C.; PIMENTA, P. F.; MOURA, F. C. **WebGIS aplicado ao Serviço de Informação do Estado do Pará**, Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.4728. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p1641.pdf>>. Acesso em: 05 set. 2011.

BRAGANÇA, R. **Avaliação de Incrementos de Temperatura no Zoneamento Agroclimatológico para a Cultura do Café no Estado do Espírito Santo**. 2012. 275f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro. 2012.

BRASIL. Secretaria de Política Agrícola. Departamento de Gestão de Risco Rural. Coordenação - Geral de Zoneamento Agropecuário. Portaria, n.º195, de 10 de setembro de 2008. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, n.176, p.12, Seção 1., 11 set. 2008. Disponível em: <http://www.cncafe.com.br/galeria/00000498_Portaria_195.htm>. Acesso em 18/01/2013.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Secretaria de Política Agrícola. Departamento de Gestão de Risco Rural. Coordenação-Geral de Zoneamento Agropecuário. Portaria, n.º79, de 25 de fevereiro de 2011. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, n.41, p.12, Seção 1., 28 fev. 2011. Disponível em: <[http://www.in.gov.br/visualiza/index.jsp?data=28/02/2011&jornal=1&pagina=12 &totalArquivos=160](http://www.in.gov.br/visualiza/index.jsp?data=28/02/2011&jornal=1&pagina=12&totalArquivos=160)>. Acesso em 19/01/2013

CAMARA, G.; MONTEIRO, A.; MEDEIROS, J.; DAVIS, C. **Introdução à Ciência da Geoinformação**, São José dos Campos, INPE, 2004. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/>>. Acesso em: 22/07/2011

CAMARGO, A.P. de. Balanço hídrico no Estado de São Paulo. Campinas: Instituto Agrônômico, 24p. Boletim 116, 1971.

CAMARGO, A. P. **Zoneamento da aptidão climática para a cafeicultura de arábica e robusta no Brasil**. In: INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Recursos naturais, meio ambiente e poluição. Rio de Janeiro, 1977. v.1. p.67-76.

CAMARGO, A.P.; CAMARGO, M.B.P. Definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil. *Bragantia*, v. 60, n. 1, p. 65-68, 2001.

CAMARGO, A.P. de, PEREIRA, A.R. **Agrometeorology of the coffee crop**. CAgM Report no. 58, WMO/TD no.615. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 1994. 43p

CASTRO, F. D. S. **Zoneamento Agroclimático Para Cultura Do Pinus No Espírito Santo**. 2008. 123f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, Espírito Santo. Disponível em: < http://www.btdt.ufes.br/tesdesimplificado/tde_arquivos/7/TDE-2008-06-3T131325Z-213/Publico/Fabio%20Castro.pdf> Acesso em: 25 Jan. 2014.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento – **Café - Conjuntura No ES**, Maio/2011. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/11_06_14_16_50_46_conjuntura_cafe_maio_2011.pdf>. Acesso em 25 jul. 2012.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento – **Acompanhamento da Safra Brasileira- Café**, Primeiro Levantamento - Janeiro/2013. Disponível em: < http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/13_01_09_09_10_09_primeira_estimativa_cafe_janeiro2013.pdf >. Acesso em 03 Jan. 2013.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento – **Acompanhamento da Safra Brasileira- Café**, Segundo Levantamento - Maio/2014. Pag 51. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/14_05_20_08_49_17_boleim_maio-2014.pdf>. Acesso em 07 ago. 2014.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. (1994) Universidade Federal da Paraíba (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 33; pag. 58).

EMPRAPA SOLOS - **Novo Mapa de Solos do Brasil** – Legenda Atualizada (2011). Embrapa Informação Tecnológica - Brasília, DF.

ESRI - Help of **ArcGIS Desktop 10.0** , Essential Library , What is GIS?, Key Aspects of GIS, 2010.

ESRI – Help of **ArcGIS Desktop 10.1**, Resource Center, Introduction to GIS, 2012 Disponível em: <<http://resources.arcgis.com/en/help/getting-started/articles/026n0000000t000000.htm>> Acesso em 07 Mar. 2014.

FAZUOLI, Luiz Carlos. Revista ProCampo 40ª edição (Out/Nov 2012), **Café conilon/robusta: Uma nova opção para a cafeicultura paulista**, Centro de Café ‘Alcides Carvalho’ Instituto Agrônomo de Campinas – IAC. Nov. 2012. Disponível em: <<http://www.revistaprocampo.com.br/ver-noticia/74>>. Acesso em: 07/01/2013.

FILHO, M. A. C.; PEREIRA, F. A. de C.; ANGELOCCI, L. R.; COELHO, F. E.; OLIVEIRA, G. X. S.; **Irrigação e Fertirrigação em Fruteiras e Hortaliças – O Processo de Evapotranspiração**. 2011. Embrapa Informação Tecnológica – Brasília – Distrito Federa. disponível em: <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/55930/1/IRRIGACAO-e-FERTIRRIGACAO-cap2.pdf>> Acesso em: 08 Out. 2014.

GANTZ C.; NELSON, R. (2012) - **Módulo LatLongUTMconversion** – Core Python , disponível em: <<http://downloads.pf.itd.nrl.navy.mil/docs/core/core-python-html/core.misc.html#authors>> Acesso em: 30 mai. 2014.

IJSN - Instituto Jones dos Santos Neves (2009) - **Limite Municipal e Hidrografia: Geobases/IBGE; Ottobacias: GEOBASES/IEMA/IJSN** Disponível em: <http://www.es.gov.br/Banco%20de%20Documentos/mapas/Bacias_Hidrograficas.pdf>. Acesso em: 22 mar. 2013.

INCAPER - Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural, **Governo estimula renovação das lavouras de café arábica em Dores do Rio Preto**. 2009 Disponível em: <http://www.incaper.es.gov.br/?a=noticias/2009/abril/noticias_28_04_2009_1>. Acesso em: 22/ jun. 2012.

INCAPER - Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural, **Governo lança programa para renovar e revigorar o café arábica no Espírito Santo**, “Cafeicultura de arábica no Estado”. 07 Out. 2008 Disponível em: <http://www.incaper.es.gov.br/?a=noticias/2008/outubro/noticias_07_10_2008>. Acesso em 28 jul. 2012.

MAPA 2014 - O Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa) – Página Inicial; Vegetal; Estatísticas; **Informe do Café Julho 2014**. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/vegetal/Estatistica/Caf%C3%A9/Informe-Cafe-julho-2014.xls> Acesso em: 10 Ago. 2014.

MATIELLO, J.B.; SANTINATO, R.; GARCIA, A.W.R.; Almeida, S.R.; Fernandes, D.R. **Cultura de Café no Brasil: Novo Manual de Recomendações**. Rio de Janeiro: MAPA/PROCAFE. 2002, 387p.

MATIELLO, J.B.; SANTINATO, R.; GARCIA, A.W.R.; Almeida, S.R.; Fernandes, D.R. **Cultura de Café no Brasil: Novo Manual de Recomendações**. 5.ed. Rio de Janeiro: MAPA; SARC; PROCAFÉ-SPAE; DECAF; FUNDAÇÃO PROCAFÉ, 2005. 438 p.

MATIELLO, J. B. **O café: do cultivo ao consumo**. São Paulo: Globo, 1991. 320 p. Coleção do agricultor. Grãos; Publicações Globo Rural.

MEIRELES, E. J. L. Fenologia do Cafeeiro: condições agrometeorológicas e balanço hídrico do ano agrícola 2004–2005, Brasília, DF : Embrapa Café - Informação Tecnológica, 2009. 128p.

- MINAGR - Ministério da Agricultura. Página Inicial. Vegetal. Culturas. **Café. Saiba Mais.** (2013) Disponível em <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cafe/saiba-mais>> Acesso em: 16 de Agosto de 2014.
- MIRANDA, E. E. de; (Coord.). **Brasil em Relevo.** Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 10 jan. 2013.
- OIC - Organização Internacional Do Café/ International Coffee Organization - **Exportações - Dados Mensais** - Provisional Exports By Exporting Countries To All Destinations - February To July 2014 – Estatísticas. Disponível em: <<Http://Dev.Ico.Org/Prices/M3.Htm>> Acesso em: 08 set. 2014.
- PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Meteorologia Agrícola-Universidade de São Paulo.** (2007). ESALQ-Departamento de Ciências Exatas. Piracicaba, SP. Fevereiro de, 2007. Disponível em: <http://www.leb.esalq.usp.br/aulas/lce306/MeteorAgricola_Apostila2007.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2014
- PEZZOPANE, J. E. M. ; CASTRO, F. S. ; PEZZOPANE, J. R. M. ; CECÍLIO, R. A. **Agrometeorologia: Aplicações para o Espírito Santo.** 1. ed. Alegre: CAUFES, 2012. v. 1. 178p .
- SANTOS, A. R. D.. **Zoneamento agroclimático para a cultura do café Conilon (*Coffea canephora L.*) e arabica (*Coffea arabica L.*) na bacia do Rio Itapemirim, ES.** 1999. 78f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais. Disponível em: <http://www.mundogeomatica.com.br/TesesMonografias/Tese_Site/Tese_Mestrado_Prof_Alexandre.pdf> Acesso em: 05 Jan. 2014.
- SANTINATO, R., FERNANDES, A. L. T., FERNANDES, D. R. **Irrigação na cultura do café.** 2. ed. Uberaba: O Lutador, 2008. 483 p.

- SEAG - Secretaria de Estado da Agricultura, Abastecimento, Aquicultura e Pesca. **Seag promove lançamento regional do programa - Renovar Arábica**. 19 Abr. 2009. Disponível em <<http://www.seag.es.gov.br/?p=4321>>. Acesso em 30 jul. 2012.
- SENTELHAS, P. C.; ANGELOCCI, L. R. (2012a) **Evapotranspiração**. Notas de aula da disciplina Meteorologia Agrícola. ESALQ/USP-2012. Disponível em: <http://www.leb.esalq.usp.br/aulas/lce306/Aula8_2012.pdf>. Acesso em: 25 abr. 2014.
- SENTELHAS, P. C.; ANGELOCCI, L. R. (2012b) **Balanço Hídrico**. Notas de aula da disciplina Meteorologia Agrícola. ESALQ/USP-2012.<http://www.leb.esalq.usp.br/aulas/lce306/Aula9_2012.pdf>. Acesso em: 25 abr. 2014.
- SILVA, K. O. et al. **Análise de Métodos de Estimativa de Evapotranspiração na Otimização de Sistemas de Drenagem**. Rev. bras. eng. agríc. ambient., v. 9, n. 2, 2005. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1415-43662005000200002&script=sci_arttext> Acesso em: 09 Out. 2014.
- SILVA; K. R. **Metodologia para Espacialização do Balanço Hídrico: Aplicação no Zoneamento Edafoclimático para a Seringueira no Espírito Santo**. 2010. 91f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, Espírito Santo.
- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. Centerton: Drexel Institute of Technology, 1955. 104p. Publications in climatology, v. 8, n. 1.