



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL

MUDANÇAS NO PADRÃO DAS
VAZÕES MÉDIAS ANUAIS NA BACIA
DO RIO SÃO FRANCISCO

MATHEUS ROCHA GUERRA

ORIENTADOR: DIRCEU SILVEIRA REIS JUNIOR

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL**

**MUDANÇAS NO PADRÃO DAS VAZÕES
MÉDIAS ANUAIS NA BACIA DO SÃO
FRANCISCO**

MATHEUS GUERRA

**TRABALHO DE PROJETO FINAL 2 SUBMETIDO AO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE
BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
BACHAREL EM ENGENHARIA
AMBIENTAL.**

APROVADA POR:

**Prof. Dirceu Silveira Reis Junior (ENC/FT/UnB)
(ORIENTADOR)**

**Saulo Aires de Souza (Membro Externo)
(CO-ORIENTADOR)**

**Sérgio Koide
(AVALIADOR)**

**Ricardo Tezini Minoti
(AVALIADOR)**

DATA: 8 de Junho de 2021 BRASÍLIA/DF

FICHA CATALOGRÁFICA

GUERRA, MATHEUS

Mudança no padrão das vazões médias anuais na bacia do São Francisco.

[Distrito Federal] 2021. viii, p. (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2021)

Trabalho de Projeto Final 2- Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Equações de Budyko
 2. Reconstituição de vazões
 3. Bacia do Rio São Francisco
 4. Separação de influências
- I. ENC/FT/UnB II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

GUERRA, M. (2021). **Mudança no padrão das vazões médias anuais na bacia do São Francisco.** Trabalho de Projeto Final 2, Publicação, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: MATHEUS ROCHA GUERRA

TÍTULO DO TRABALHO DE PROJETO FINAL 2: **Mudança no padrão das vazões médias anuais na Bacia do São Francisco.**

ANO: 2020

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final 2 e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final 2 pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Dedicatória

Aos meus pais que sempre sonharam em me ver crescer e me tornar um grande profissional e ser humano. Agradeço ao meu orientador por todo conhecimento ensinado.

Resumo

O presente trabalho tem como objetivo identificar e quantificar as mudanças no padrão das vazões médias anuais na bacia do São Francisco e poder separar quanto dessas mudanças foram ocasionadas por mudanças climáticas e quanto foram por alterações decorrentes de alterações no uso e ocupação do solo. Para isto foi necessário naturalizar as vazões observadas ao longo do tempo utilizando o método da reconstituição de vazões, que consiste em recolocar todas as captações para usos consuntivos e posteriormente aplicar o teste de Pettitt que fornece um resultado de mudança ou não nas vazões. Por fim, foi utilizado o método da decomposição, que consiste em separar as influências por meio de um parâmetro ω que é específico de cada bacia. Caso tenha ocorrido mudança neste parâmetro, significaria que as mudanças nas vazões médias anuais foram causadas por alterações no uso e cobertura do solo e também por alterações climáticas, caso este parâmetro não tenha sofrido mudanças, não houve influência do uso e cobertura do solo nas vazões médias anuais da bacia. Neste trabalho verificamos que as alterações climáticas e humanas causaram alterações significativas nas vazões médias anuais, sendo as climáticas mais significativas.

Abstract

The current work aims to identify and quantify changes in the natural standard of runflow annuals in São Francisco basin and to separate which ones of these influences are results of changes in the use and occupation of the soil and which ones of these changes are occasioned due to climate changes. For this work, it was necessary naturalization the run flow using the reconstitution method the consists of putting the consumptive withdrawals back in the run flow. After that we Applied the Pettit Test that give us a result of changes or not changes in the run flows. Finally, we used the decomposition method that consists on separating the influences by using a ω parameter which is specified on each basin. If this parameter has changed, means that the annual average run flow are due to the alteration on use and occupation of the soil and by climate changes. If this parameter has not changed, the changes in the natural run flow are results Only of the modifications in the use and occupation of the soil. In this study we checked significant changes caused by climate changes and humans in the natural streamflow.

Sumário

1.0.	Introdução.....	10
2.0.	Objetivos	13
2.1.	Objetivo Geral	13
2.2.	Objetivos específicos	13
3.0.	Referencial Teórico	14
3.1.	Influência do clima na hidrologia	14
3.2.	Influência do uso e cobertura do solo na hidrologia.....	15
3.3.	Usos consuntivos	17
3.4.	Reconstituição de vazões	19
3.5.	Equações do tipo Budyko	21
3.6.	Naturalização de Vazões	26
3.6.1.	Métodos para naturalização de Vazões	27
4.0.	Área de estudo	30
4.1.	Uso e ocupação do solo na bacia do São Francisco	36
4.2.	Vazões médias na bacia do São Francisco	36
4.3.	Clima na região Nordeste	38
5.0.	Metodologia	40
5.1.	Dados Hidrológicos	41
5.2.	Avaliação do momento de mudança nas vazões utilizando o método não-paramétrico de Pettitt.....	46
5.3.	Método da decomposição	47
6.0.	Resultados e discussões.....	50
6.1.	Reconstituição das vazões	50
6.2.	Identificação dos períodos de mudança.....	52
6.3.	Estimativa das influências climática e de uso e cobertura do solo nas bacias.....	54
7.0.	Conclusão	59
8.0.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

Lista de Figura

Figura 3.1 - Demanda hídrica por setor usuário na Bacia do São Francisco	19
Figura 3.2 - Fluxograma para irrigação.....	20
Figura 3.3 – Relação de E/P e E0/P para diferentes ω (DORNELES, 2018).....	25
Figura 3.4 - Fluxograma para seleção da metodologia de naturalização de vazões.....	26
Figura 4.1 - Região Hidrográfica do São Francisco.....	31
Figura 4.2 - Divisão da Bacia do São Francisco	33
Figura 5.1 - Fluxograma das atividades a serem realizadas no estudo da mudança no padrão das vazões média anuais na bacia do São Francisco	40
Figura 5.2 - Estações fluviométricas na bacia do São Francisco que não possuem influência de reservatórios e que atendem o critério de tamanho de série histórica.	43
Figura 5.3 - Imagem com as grades de referências de 30 km pré-definidas em cada bacia hidrográfica em cada estações fluviométricas e o esquema que demonstra o procedimento de interpolação IDW (Saulo, comunicação pessoal).	44
Figura 5.4 - Decomposição ABC (Dorneles, 2018)	48
Figura 6.1 - Percentual de anos em que tiveram mudanças nas vazões médias anuais	53
Figura 6.2 - Distribuição espacial das estações e a influência relativa do clima em porcentagem na bacia do São Francisco.	57
Figura 6.3 - Distribuição espacial das estações com maiores influências relativas de uso e cobertura do solo na Bacia do São Francisco.....	58
Figura 6.4 - Índice de aridez nas estações	59

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Tabela para usos consuntivos no Brasil (ANA).....	18
Tabela 4.1 - Região Fisiográfica do São Francisco.....	32
Tabela 6.1 - Tabela com as vazões reconstituídas	51
Tabela 6.2 - Tabela com os anos de mudança nas vazões médias anuais reconstituídas.....	52
Tabela 6.3 - Tabela com valores de ω , dQ_c e dQ_h	54

Lista de Equações

Equação 3.1	21
Equação 3.2	21
Equação 3.3	22
Equação 3.4	22
Equação 3.5	23
Equação 3.6	23
Equação 3.7	24
Equação 3.8	24
Equação 5.1	46
Equação 5.2	46
Equação 5.3	49
Equação 5.4	49
Equação 5.5	49
Equação 5.6	49
Equação 5.7	49
Equação 5.8	50

1.0. Introdução

A correta gestão dos recursos hídricos depende de dados e informações para que possa ser conduzida de maneira adequada e está diretamente relacionada com os processos de circulação da água, juntamente com o fluxo de energia na escala da bacia. É de grande importância ter dados sobre a disponibilidade hídrica da bacia para que se realize uma gestão integrada que concilie os diferentes usos d'água, incluindo o abastecimento humano que tem prioridade sobre os outros usos, e assim garantir desenvolvimento socioeconômico.

O homem tem feito uso da terra desde os seus primórdios e isto possibilita a geração de múltiplos benefícios, como prover alimentos, abrigo, abastecimento humano, criação de animais. Tais atividades modificaram o ambiente no qual a população se encontrava. No início, o uso de recursos naturais não gerava grandes alterações pois os recursos após o seu uso, retornavam aos ciclos bioquímicos e não havia grandes variações energéticas nos biomas. Para as décadas futuras podemos esperar diversos problemas como o aumento da população mundial, em especial o crescimento da população urbana e outras alterações no uso do solo que podem as vazões à modificações. As alterações nas características iniciais locais remoldaram as bacias hidrográficas originais causando alterações na topografia, substituição na vegetação nativa por atividades agrícolas que podem modificar as trocas energéticas de água superficial e atmosférica e ocasionar alterações nas vazões médias de cursos de rios.

A disponibilidade hídrica é diretamente relacionada com alterações naturais de vazões que ocorrem ao longo do tempo. A vida de várias espécies lóticicas está sincronizada com as variações anuais e sazonais de vazões. No entanto, as mudanças antropogênicas nos sistemas hidrológicos nos mostram que as modificações podem ser severas e acarretar em prejuízos.

O clima é o resultado do comportamento e a dinâmica das condições da atmosfera em um dado local, composto por um conjunto de condições meteorológicas que se sucedem e se repetem ciclicamente ao longo do tempo. Trata-se, portanto, de feições mais ou menos permanentes, diferentemente do tempo atmosférico, que são as condições naturais momentâneas do ar. Logo, tempo e clima são expressões distintas.

Ao caracterizar o clima de uma determinada região, estabelecemos um panorama sobre o regime anual de chuvas, as estações que se definem localmente, as temperaturas médias e uma série de elementos que marcam as suas condições naturais ciclicamente ao longo de alguns meses ou anos.

Caso ocorram mudanças no clima, pode ser que se afete a distribuição espacial e temporal das variáveis hidrológicas, tendo como consequências alterações nos regimes de precipitação e vazão dos rios. Aumentos ou reduções no volume de escoamento de uma bacia hidrográfica podem, por exemplo, produzir danos aos ecossistemas, afetar a produção de alimentos, abastecimento de água para populações humanas, navegabilidade e geração de energia. Atualmente, buscam-se relações que permitam entender os processos de mudanças climáticas a fim avaliar os impactos e mitigá-los, assim como avaliar as incertezas inerentes ao processo de modelagem hidrológica de tais mudanças.

Variabilidade hidroclimática refere-se à variação nos componentes dos recursos hídricos como, por exemplo, precipitação pluviométrica, evapotranspiração, escoamento superficial. Em especial, a variabilidade da precipitação e da vazão ou até mesmo a mudança climática as impactam e por isso são as mais investigadas devido a sua importância direta na gestão dos recursos hídricos das bacias hidrográficas (LOPES, 2014).

Os cenários de mudanças climáticas apontam para a redução no regime de chuva e o aumento da sazonalidade em várias regiões do planeta, o que podem afetar o regime hidrológico e aumentar a expansão das áreas áridas e semiáridas. Em seu estudo, Souza *et al.* (2016) encontraram um nível ótimo de sazonalidade das chuvas para uma maior produtividade do ecossistema. Menores sazonalidades promovem chuvas menos intensas, o que conseqüentemente, aumenta a interceptação da chuva pelo dossel da vegetação, que retorna à atmosfera sem passar pelos processos fisiológicos das plantas. Por outro lado, se a sazonalidade for alta, as chuvas serão mais intensas, e um maior volume de escoamento superficial será formado, reduzindo a disponibilidade de água no solo. Por isso, estudos que caracterizam as condições atuais dos componentes do balanço hídrico são importantes, sobretudo em escala regional (INÁCIO SILVA *et al.*, 2017).

O efeito projetado das mudanças climáticas no escoamento de água superficial e na recarga de água subterrânea é variável, dependendo da região e do cenário climático considerado (IPCC, 2001), mas relaciona-se, em grande parte, com as mudanças previstas para a precipitação (IPCC, 2001; KROL *et al.*, 2006). É previsto que a magnitude e a frequência de vazões máximas aumentem na maioria das regiões do planeta e que as vazões mínimas sejam menores em muitas regiões.

Quanto ao uso do solo, as taxas de desmatamento, expansão da fronteira agrícola, urbanização, bacias de drenagem e outros tipos de usos têm acelerado em função do

crescimento populacional mundial. Hidrólogos reconheceram por mais de meio século que estas atividades impactam significativamente o regime hidrológico local. Neste século é provável que todas essas atividades continuem aumentando. Fenômenos hidrológicos como evapotranspiração, interceptação, transporte de sedimentos, infiltração e as vazões médias anuais sofrerão mudanças. Estes fatores não são objeto de estudo apenas de hidrólogos e ecologistas, também são de grande importância para a engenharia como um todo, como por exemplo para o controle estrutural, abastecimento de água, geração de energia, atividades industriais.

A Bacia do Rio São Francisco está entre as mais importantes Bacias Hidrográficas do Brasil. Está localizada nas regiões Nordeste, Sudeste e Centro-Oeste do país.

A bacia do São Francisco possui grande relevância para o país, em especial para a região Nordeste, não apenas por levar água para uma região semiárida do país, mas também pelo potencial hídrico passível de aproveitamento hidrelétrico e por sua contribuição histórica e econômica para a região.

A bacia do São Francisco apresenta diversos usos consuntivos de água (usos em que a água é consumida no processo) em seus corpos hídricos. Esses usos que retiram água do solo ou dos rios acabam alterando o regime hidrológico local podendo alterar as vazões médias anuais observadas na área de estudo. Há também influências climáticas que podem ser oriundas de atividades antrópicas ou não, e modificações no uso e cobertura do solo. Todas essas atividades acabam interferindo no padrão das vazões médias anuais na bacia. No presente estudo desejamos saber o comportamento das vazões médias anuais na bacia do São Francisco, para isto é necessário reconstituir as vazões que seriam observadas caso não tivessem ocorridas alterações que impactaram as vazões médias da bacia. Desejamos saber quais são as mudanças observadas, identificar as séries com mudanças, e poder separar e quantificar o que é influência do clima, de alteração no uso e cobertura do solo.

2.0. Objetivos

2.1. Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é identificar mudança nas vazões médias anuais na bacia do rio São Francisco e tentar quantificar as influências do clima e humana nestas alterações.

2.2. Objetivos específicos

- Reconstituir as séries de vazões médias anuais nas bacias contribuintes às estações fluviométricas (sem influência de reservatório) localizadas na bacia do Rio São Francisco considerando os diversos usos consuntivos na bacia;
- Identificar as estações fluviométricas (sem influência de reservatório) que apresentam mudanças estatisticamente significantes nas séries reconstituídas de vazões médias anuais;
- Quantificar as contribuições oriundas da variabilidade/mudança do clima e das alterações no uso e cobertura do solo naquelas bacias em que foram identificadas mudanças nas séries reconstituídas de vazões médias anuais.

3.0. Referencial Teórico

3.1. Influência do clima na hidrologia

O ciclo hidrológico tem relação direta com as condições climáticas locais. As condições climáticas são determinantes para os parâmetros do ciclo hidrológico, incluindo as vazões médias de uma bacia hidrográfica como a do São Francisco. A biosfera é constituída por elementos como atmosfera, litosfera e hidrosfera, que produzem espaços naturais que propiciam um dinamismo completo, seus fenômenos climáticos exercem grande influência sobre os parâmetros hidrológicos.

A influência do clima na hidrologia é conhecida, porém ainda falta muito pra se ter o completo entendimento dos processos hidrológicos que ocorrem nas bacias hidrográficas. As variáveis hidrológicas como a precipitação, evapotranspiração e vazão, influenciam os processos ecológicos nos sistemas aquáticos e terrestres. Da mesma forma os processos ecológicos podem alterar o ciclo hidrológico. (TUCCI, 2009)

A umidade do solo depende do clima da região. Este é resultado da combinação do tipo de solo, vegetação, infiltração e da própria precipitação. Quando qualquer um dos componentes dos sistemas que interagem se altera, o ciclo muda para outro estágio dinâmico, estas mudanças não são lineares, ou seja, o que mudar em um não altera o outro na mesma proporção. Por exemplo, a redução interanual de precipitação pode reduzir o nível dos rios e o lençol freático, porém não exatamente o que deixou de precipitar será observado no volume reduzido nas águas subterrâneas. Esta redução pode acabar alterando a vegetação, e com a redução da vegetação que culminará em mudanças finais no clima regional.

Os relatórios do IPCC (IPCC, 2001; KROL et al., 2006) indicam um maior número de dias quentes e ondas de calor em todas as regiões continentais, principalmente em regiões nas quais a umidade do solo vêm diminuindo, além de eventos extremos mais intensos. Essas modificações climáticas que foram constatadas pelo Climate Research Unit (componente da Universidade do Leste de Anglia dos Estados Unidos) e podem exercer influências sobre eventos extremos.

O regime de chuvas também pode sofrer influência significativa de eventos anômalos, no caso no nordeste do Brasil como o el niño e la niña. GURJÃO et al (2012) propuseram um estudo para identificar as anomalias positivas e negativas. Em seu estudo realizado no ano de 1997, ele não identificou a presença de chuvas de maior intensidade nos meses úmidos (de janeiro e fevereiro), porém março e abril ele registrou chuvas acima da média influenciada pela entrada de dois sistemas frontais no sul da Bahia que se acoplaram as zonas de convergência do atlântico sul. O período mais ativo do el niño somado a influência de vórtices ciclônicos inibiu a formação de chuvas no período de 1998 de janeiro a abril. A la niña pode estar associado ao oposto, ou seja, chuvas mais intensas como observados no biênio de 2007/2008 que foram os anos de maior atividade do evento.

3.2. Influência do uso e cobertura do solo na hidrologia

As vazões dos cursos d'água de uma bacia hidrográfica tem relação direta com o uso e ocupação do solo local. No estudo realizado por MILLER (2018) verificou-se aumento do escoamento superficial quando ocorre desmatamento, sendo o aumento mais significativo na estação seca. Como a quantidade de água interceptada pelo dossel é menor, a evapotranspiração e a infiltração também tendem a reduzir com o desmatamento e a água precipitada acaba elevando o escoamento superficial atingindo os rios. Com as mudanças climáticas, os cenários de aumento da temperatura e da precipitação tendem a elevar a evapotranspiração e escoamento, já o aumento da temperatura acompanhado de diminuição das precipitações tende a aumentar a evapotranspiração e reduzir o escoamento superficial, a infiltração e a evaporação. Durante a estação seca, o escoamento tende a aumentar consideravelmente.

A umidade do solo é uma combinação de diversos fatores como infiltração, tipo de vegetação e também da precipitação. Caso haja alteração em qualquer um dos fatores, o sistema como um todo irá se alterar. Para exemplificar, uma redução nos valores anuais de chuvas pode reduzir a vazão dos rios e o nível do lençol freático. As plantas são diretamente dependentes das águas subterrâneas, pois suas raízes conseguem extrair água de uma determinada

profundidade, caso esta se altere, pode comprometer a vegetação ali presente. (ECOHIDROLOGIA, 2009). Também relacionado com a umidade do solo podemos destacar a existência de zonas úmidas. As zonas úmidas possuem um papel fundamental no processo de transporte do material dissolvido e em suspensão. Pelas águas possuem baixas velocidades nas planícies de inundação, o material se deposita e cria condições favoráveis para o desenvolvimento dos organismos. O aumento da velocidade do escoamento superficial pode prejudicar o depósito de sedimentos e comprometer estes ecossistemas. Podemos destacar, que também atuam como reservatórios de carbono, assumindo um papel importante sobre a mitigação das mudanças climáticas e também fornecem serviços ecológicos fundamentais para as espécies de fauna e flora, assim como para o bem-estar de populações humanas. (SAMPAIO e CONCHY, 2018).

O impacto do desmatamento sobre o escoamento superficial é refletido sobre as vazões mínimas, médias e máximas. A redução da cobertura de floresta diminui a capacidade de infiltração do solo, o que conseqüentemente aumenta as vazões mínima, média e máxima, já o aumento da cobertura tem efeito contrário. A vazão mínima por sua vez depende das características do solo. Como por exemplo, quando o solo fica compactado, a capacidade de infiltração pode ser reduzida e assim o escoamento superficial aumenta que por sua vez, aumenta também a vazão mínima. Outros impactos devido ao uso do solo, como a urbanização, impermeabilização do solo com pavimentação e edificações também reduzem a infiltração da água no solo. Como conseqüência há um aumento no escoamento superficial o que demanda obras hidráulicas como condutos e canais para atenuar o efeito de cheias, inundações e demais danos. (TUCCI, 2002).

Como mencionado anteriormente, o uso do solo pode alterar as vazões médias anuais. No caso de áreas urbanas, impermeabilização, substituição da vegetação permanentes por culturas anuais, canalização de rios, construção de bacias de detenção e outros fatores vão interferir no ciclo hidrológico natural, alterando os valores médios de parâmetros como infiltração, percolação, escoamento superficial e evapotranspiração. Além dessas mudanças paisagísticas, estas alterações alteram o albedo (como a energia é refletida de volta para a atmosfera), mudam também o vento, o perfil de ventania. Os vórtices que ocorrem no vento são capazes de transportar o vapor para o alto, vegetações mais rasteiras levam menos água para grandes elevações alterando e todos esses fatores são determinantes na formação de

nuvens.

As alterações nas vazões médias anuais podem ser oriundas de:

- (1) mudança e variabilidade de longo período em componentes do clima como precipitação e evapotranspiração potencial,
- (2) mudanças em fluxo e armazenamento de água causados por alterações no uso e cobertura do solo e
- (3) retiradas diretas de água para suprir a demanda de vários usos (consuntivos). Informações sobre os usos consuntivos em cada bacia empregadas neste estudo são de grande relevância para a estimativa adequada da influência de cada um dos fatores mencionados acima na mudança das vazões médias anuais em uma determinada bacia.

3.3. Usos consuntivos

Existem os usos consuntivos e não-consuntivos. Um uso é considerado consuntivo quando a água retirada é consumida, parcial ou totalmente, no processo a que se destina, não retornando diretamente ao corpo d'água. O consumo pode ocorrer por evaporação, transpiração, incorporação em produtos, consumo por seres vivos, dentre outros. A definição e a estimativa de consumo pode ser subjetiva e variar em função das diferentes aplicações das estimativas. Os usos da água estão divididos em categorias que são o abastecimento humano (urbano e rural), o abastecimento animal, a indústria de transformação, a mineração, a termoeletricidade e a irrigação.

As culturas anuais têm suas necessidades hídricas de acordo com o estágio de crescimento na qual se encontra, do tipo do solo e do clima local. Boa parte dessa necessidade pode ser suprida com as chuvas locais e se for preciso, com a irrigação. A irrigação é definida como conjunto de técnicas destinadas a inserir água no tempo e espaço que modificarão as possibilidades agrícolas locais com finalidade de corrigir ou adequar a distribuição natural das necessidades as culturas (LOPES, 2013). Bernardo (1982) definiu a irrigação como a quantidade hídrica necessária para atender à evapotranspiração e à lixiviação dos sais do solo.

Por se tratar de um uso consuntivo e numericamente o maior nacionalmente, acaba por ser conflitante com os demais usos da água. Na tabela 3.1 abaixo vemos os usos consuntivos no Brasil com seus respectivos valores de retirada, consumo, retorno e porcentagem observados no ano de 2017 pela Agência Nacional de ÁGUAS.

Tabela 3.1 - Tabela para usos consuntivos no Brasil (ANA)

Uso	retirada (m ³ /s)	consumo (m ³ /s)	retornar (m ³ /s)	retirada % total	consumo % total
Irrigação	1.803,6	792,1	291,5	52	68,4
Abastecimento Humano	496,2	99,2	397	23,8	8,6
Indústria	189,2	101,7	87,5	9,1	8,8
Abastecimento Rural	34,5	27,6	6,9	1,7	2,4
Mineração	32,9	9,6	23,3	1,6	0,8
Termelétrica	79,5	2,5	77,0	3,8	0,2
Uso animal	166,8	125,1	41,7	8	10,8

Os estudos feitos pela Agência Nacional de Águas foram feitos em nível nacional. Saulo (2019, comunicação pessoal) realizou um estudo que utilizou informações a nível nacional para gerar séries mensais de retirada, consumo e retorno de cada bacia afluyente às estações fluviométricas do São Francisco. Esses dados serão utilizados no estudo.

No estudo feito por (VILLELA, 2013) foi possível quantificar as vazões demandadas para cada setor usuário na bacia do São Francisco ao longo do ano. A demanda hídrica do São Francisco reflete de maneira similar as demandas nacionais, confirmando que a irrigação é o setor que mais utiliza da água. Os resultados podemos observar no gráfico 3.1 a seguir:

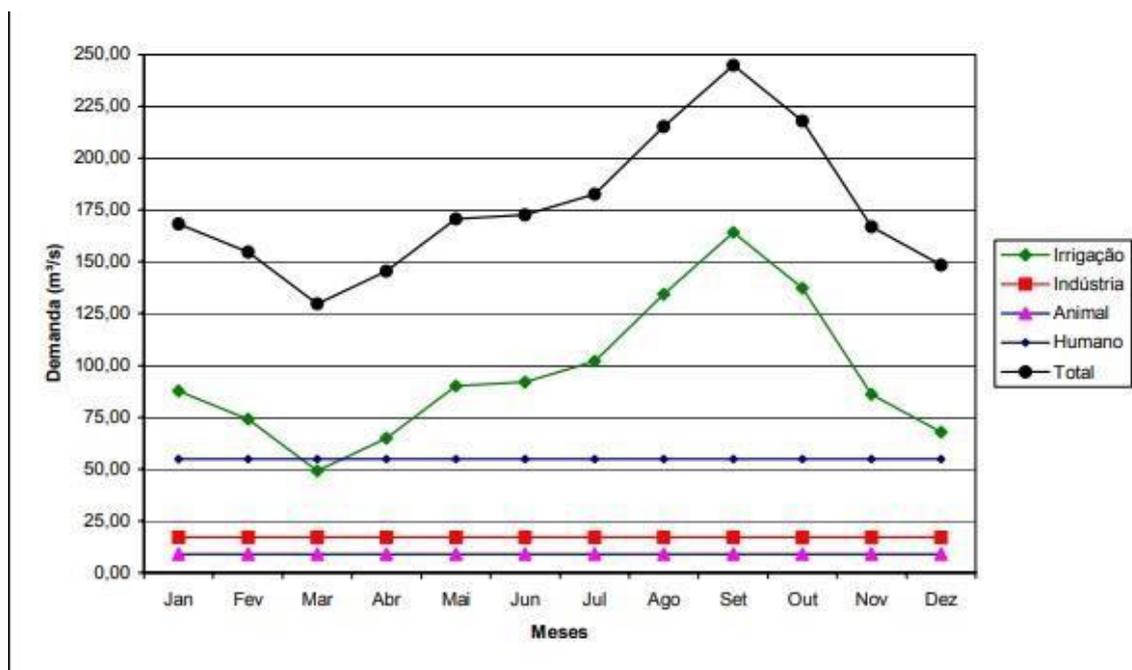


Figura 3.1 - Demanda hídrica por setor usuário na Bacia do São Francisco

3.4. Reconstituição de vazões

Com base nas séries mensais de usos consuntivos estimadas pela Agência Nacional de Águas (diversos usos), Souza (2019, comunicação pessoal) obteve as respectivas séries mensais para usos consuntivos para cada bacia hidrográfica contribuinte às estações fluviométricas cujos dados estão armazenados no site Hidroweb da Agência Nacional de Águas (ANA). Esses dados serão utilizados para realizar a reconstituição das vazões médias anuais em cada uma das estações fluviométricas utilizadas neste estudo.

Para podermos quantificar as mudanças e o que advém de modificações no uso do solo e o que é influência de alterações climáticas é necessário reconstituir as vazões originais das estações fluviométricas selecionadas.

Para a reconstituição das séries de vazões vamos obter os dados de usos consuntivos, que são aqueles em que há consumo de água nos processos. O relatório sobre estimativa das vazões para atividades de uso consuntivo da água na bacia do São Francisco confirma que a irrigação corresponde ao maior percentual de consumo. A irrigação é um parâmetro que depende da

evapotranspiração e também de fatores climáticos e de manejos agrícolas.

A irrigação além de representar o maior consumo também possui baixas taxas de retorno da água, de acordo com o relatório, cerca de 80% não retorna para os corpos d'água. Baseados nessas informações identificaremos os tipos de culturas existentes e estimaremos suas demandas de irrigação e por meio dessa transformação poderemos estimar quais as vazões que seriam observadas caso não tivesse essas atividades antrópicas (cerca de 80% do retirado para irrigar). Para obter a vazão de irrigação é necessário ter os valores de: área irrigada, evapotranspiração real das culturas, precipitação efetiva e eficiência da aplicação dos sistemas de irrigação. As retiradas para irrigação aparecerão nas equações como R_{ai} . Na imagem 3.2 abaixo podemos visualizar um fluxograma para a estimativa de vazões para irrigação.

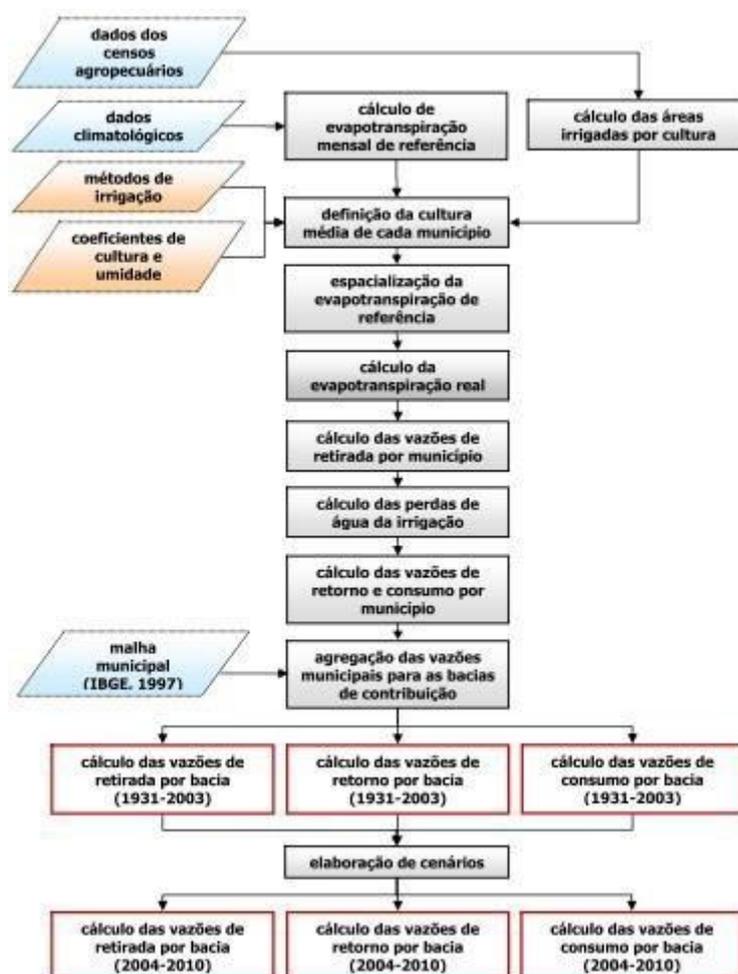


Figura 3.2 - Fluxograma para irrigação

A evapotranspiração total pode ser calculada pela evapotranspiração da área irrigada somada com a da área sem irrigação como podemos ver na equação a seguir:

$$ET = E_i + E_{ai}$$

Equação 3.1

sendo E_i a evapotranspiração da área não irrigada e E_{ai} a referente à área irrigada.

O uso consuntivo pode ser denominado também como retiradas totais. Essas retiradas totais são a soma do uso para irrigação com os demais usos. Dessa maneira a vazão real seria a soma da vazão medida nas estações fluviométricas com as retiradas de usos consuntivos. A equação da vazão reconstruída fica da seguinte forma:

$$Q_{recon} = Q_{est} + R_{ai} + R_{du}$$

Equação 3.2

Onde $Q_{reconst}$ é a vazão reconstruída, Q_{est} é a vazão que passa na estação fluviométrica e R_{ai} são as retiradas para áreas irrigadas em valores reais e R_{du} são as retiradas para demais usos.

3.5. Equações do tipo Budyko

Mikhail Budyko (1974) observou que o ciclo hidrológico possui relação evidente com os componentes do balanço energético, visto que a transformação da precipitação (P) em escoamento (Q) é influenciada diretamente pela evapotranspiração (ET) que, por sua vez, consiste em um dos processos básicos de transformação de energia solar na Terra. (OTSUKI, 2015)

As hipóteses de Budyko (1974), também conhecido como curva de Budyko, relaciona o índice de aridez (ET_p/P) e a parcela de evapotranspiração sobre a chuva (ET/P). O método considera que na escala média anual, os fatores climáticos chuva (P) e evapotranspiração potencial (ET_p) são os principais reguladores do balanço hídrico, visto que as mudanças interanuais no

armazenamento de água no solo são muito menores que esses componentes (Precipitação e Evapotranspiração) e por isso podem ser desprezadas. Esse método permite determinar a evapotranspiração na escala anual e tem sido amplamente utilizado em algumas regiões do mundo, por ser de fácil aplicação, permitindo estudar como o balanço hídrico responde às mudanças na precipitação e em outras variáveis climáticas. (INÁCIO SILVA et al., 2017)

As equações de Budyko têm sido utilizadas na hidrologia e acabaram se tornando base para modelos mais sofisticados. Apesar de simples, nos fornece uma análise precisa entre evapotranspiração anual em longos períodos e um balanço de escala energética anual. Zhang et al. (2004), baseados em Fu (1981), desenvolveram uma expressão analítica que nos mostra como as características climáticas e da bacia hidrográfica interferem na repartição de Precipitação em escoamento superficial e Evapotranspiração.

Essas hipóteses também podem ser utilizadas para estudar como as vazões de um rio podem sofrer alterações por interferências de temperatura e precipitação.

Com as acelerações do uso do solo pelo homem e possíveis mudanças climáticas observadas nos últimos períodos, que aceleraram após a revolução industrial renovaram o interesse nos estudos em como essa metodologia pode servir para analisar possíveis cenários futuros principalmente na gestão de recursos hídricos futuros.

O cientista Budyko estudou dois casos, um em regiões áridas e outro em regiões úmidas. A equação 3.3 a seguir mostram os estudos para regiões secas e equação 3.4 para locais com abundância hídrica respectivamente. R_n é a radiação líquida e LeP o calor latente de vaporização da água (DORNELES, 2018)

$$\lim_{\frac{R_n}{LeP} \rightarrow \infty} \left(\frac{E}{P} \right) = 1$$

Equação 3.3

$$\lim_{\frac{R_n}{LeP} \rightarrow \infty} \left(\frac{E}{P} \right)$$

Equação 3.4

Os balanços de energia e água ao longo do tempo podem ser expressas por meio de uma expressão que tem como variáveis água, calor e uso da terra. Nas equações de Budyko, a evapotranspiração é uma medida de energia e a precipitação de água representa a quantidade

disponível. Por se tratar de uma transformação de estado da água do estado líquido para o gasoso, a Evapotranspiração representa não apenas uma parcela de água, mas também de energia radiante na interface zona vadosa-atmosfera.

Desenvolvendo as equações e para longos períodos a variação de armazenamento de água na bacia é pequena e, portanto, pode ser desconsiderada, a média anual de termos de longos períodos do balanço de água e energia pode ser escrita como equação 3.5:

$$P = E + Q$$

Equação 3.5

Esta equação informa que a precipitação que cai bacia hidrográfica, considerando longas escalas de espaço e tempo, que não é armazenada nos lençóis freáticos, sairá como evapotranspiração ou escoamento superficial.

A Equação 3.6 abaixo nos diz que a radiação solar atingindo a superfície em um período longo de tempo serve como energia para evaporar a água e aquecer a superfície. Também de acordo com esta equação, a máxima evapotranspiração ocorreria quando a máxima radiação solar incidente é consumida pela evaporação de água da superfície terrestre. Sendo R_n a radiação líquida na superfície terrestre e H é o fluxo de calor sensível.

$$\frac{R_n}{L} = E + \frac{H}{L}$$

Equação 3.6

Procura-se fazer uma relação entre a evapotranspiração e precipitação, em uma média a longo prazo para representar o clima da bacia. Para o Budyko, a razão de Evapotranspiração potencial sobre Precipitação representa o clima da bacia. O ponto Evaporação Inicial sobre Precipitação inicial representa um ponto que não houve alterações na bacia, ou seja, um ponto onde os fatores climáticos não foram alterados e os antrópicos não interferiram.

Também existe o ϕ , que é um parâmetro hidrológico que representa o índice de aridez. Este índice é a razão entre Evapotranspiração potencial e Precipitação. O índice ϕ permite identificar as áreas de evapotranspiração limitada pela energia disponível.

$$\phi = \frac{E_0}{P}$$

Equação 3.7

O ϕ pode ser menor que 1 para áreas úmidas e maior que 1 como as encontradas nas regiões semiáridas. O clima da bacia finalmente acaba sendo definido pela Equação 3.6:

$$\frac{E}{P} = 1 + \frac{E_0}{P} \left[\left(1 + \frac{E_0}{P} \right)^\omega \right]^{\frac{1}{\omega}}$$

Equação 3.8

Por meio dessas equações podemos quantificar as mudanças nas vazões médias anuais e os valores de evapotranspiração e precipitação podem ser comparados e assim termos indicativos de mudança nas vazões. Se constatarmos mudanças nos valores de ω ou não, poderemos separar as mudanças oriundas de uso e ocupação do solo ou de alterações climáticas.

Assim baseado em Fu (1981), Zhang et al. Derivou a equação que relaciona evapotranspiração com precipitação e com evapotranspiração potencial sobre precipitação para grandes escalas temporais onde as variações de armazenamento de água na bacia podem ser desconsideradas.

De acordo com Fu, a taxa de evapotranspiração sobre precipitação aumenta com a diferença entre evapotranspiração real e potencial, e reduz com o aumento da precipitação. Para uma dada precipitação, a taxa de evapotranspiração potencial sobre evapotranspiração real aumenta com a precipitação residual que é a subtração de precipitação com evapotranspiração (DORNELES).

A equação de fu que é um tipo das equações de Budyko, também apresenta um único parâmetro dependente das características e fatores da bacia que definem o modo com que a precipitação é transformada em evapotranspiração e escoamento superficial. Assim baseado em Fu (1981), Zhang et al. Derivou a equação que relaciona evapotranspiração com precipitação e com evapotranspiração potencial sobre precipitação para grandes escalas temporais onde as variações de armazenamento de água na bacia podem ser desconsideradas.

De acordo com Fu, a taxa de evapotranspiração sobre precipitação aumenta com a diferença entre evapotranspiração real e potencial, e reduz com o aumento da precipitação. Para uma dada precipitação, a taxa de evapotranspiração potencial sobre evapotranspiração real aumenta com a precipitação residual que é a subtração de precipitação com evapotranspiração.

A equação 3.8 é função unicamente do parâmetro ω que expressa as condições fisiográficas da bacia. Sendo assim, para que se obtenha os valores médio anuais de evapotranspiração real, potencial e precipitação é necessário que se tenha uma estimativa desse parâmetro. O parâmetro ω é obtido a partir do gráfico apresentado na figura 3.3 com os valores de Evapotranspiração Real sobre Precipitação no eixo das abcissas e dos valores de Evapotranspiração potencial sobre precipitação no eixo das ordenadas). Caso o ω permaneça o mesmo, é um indicativo que a mudança na vazão ocorreu devido somente a mudanças climáticas, mas o ω pode mudar e isto seria um indicativo que os parâmetros da bacia foram alterados. Com a obtenção dos valores da equação de Budyko, podemos solucionar a equação por meio de métodos iterativos como o método da bissecção para a obtenção do parâmetro ω . Na imagem 3.3 a seguir podemos ver como o ω varia de acordo com o clima da bacia e pode ser determinado com valores de evaporação real, precipitação e evapotranspiração potencial resultando no seguinte gráfico.

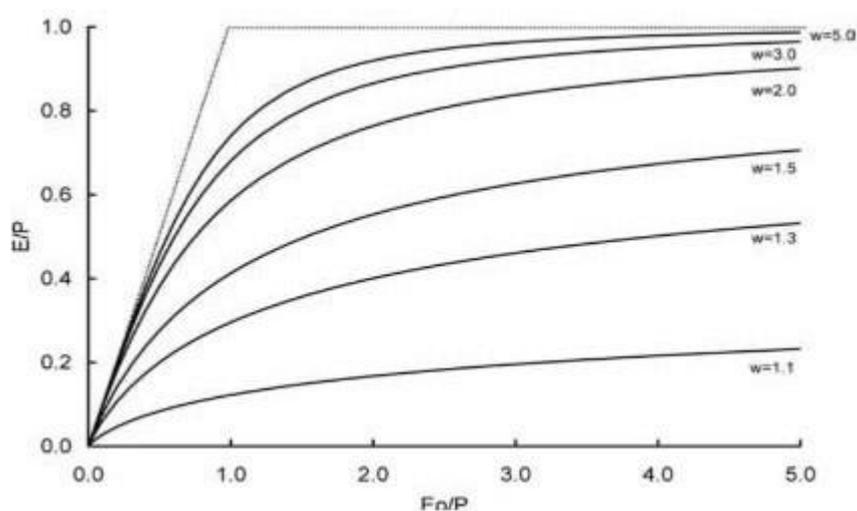


Figura 3.3 – Relação de E/P e E_0/P para diferentes ω (DORNELES, 2018).

3.6. Naturalização de Vazões

Existem seis métodos para naturalização de vazões, eles se diferem principalmente de acordo com a origem dos dados e os modelos subjacentes utilizados. Neste estudo utilizaremos a reconstituição. Na figura 5.3 abaixo vemos um diagrama que nos mostra qual método utilizar de acordo com os tipos de dados existentes e por meio dele conseguimos chegar ao método escolhido.

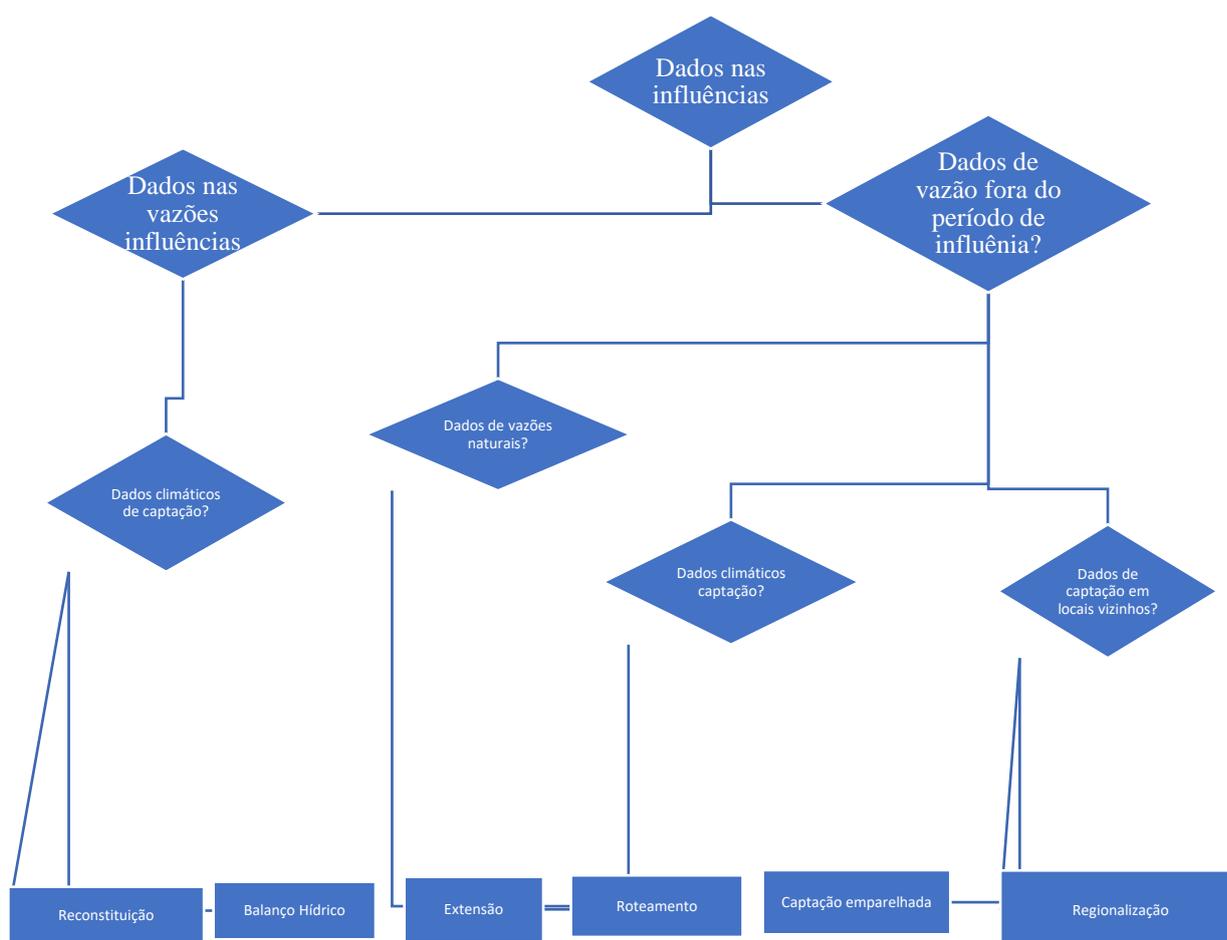


Figura 3.4 - Fluxograma para seleção da metodologia de naturalização de vazões

A reconstituição, extensão, métodos vizinhos são baseados modelos hidrológicos simulando vazões naturalizadas estimadas em parâmetros refletindo condições hidrológica naturais. Em reconstituição, a falta de informações em observações no passado no período de influência nas vazões e as influências antropogênicas são exploradas em estimativas indiretas para deixar os parâmetros representando condições hidrológicas naturais.

Para realizar os cálculos de reconstituição de vazões, utilizamos a biblioteca Pandas do Python. Esta biblioteca tem como funcionalidade a análise de dados e fornece resultados com precisão e rapidez. Para isto foram selecionadas as estações sem influência de reservatórios (Saulo, comunicação pessoal), e realizamos as somas dos dados de vazão observada com as retiradas para usos consuntivos para chegar as vazões reconstituídas. Foi necessário realizar filtragens para remover os meses com falhas tanto nas medições quanto nas retiradas para usos consuntivos. Também foi necessário calcular as vazões médias anuais visto que os dados apresentavam vazões médias mensais e por fim somar as colunas que possuíam as vazões médias anuais obtidas com as retiradas para usos consuntivos e chegamos ao nosso objetivo que era obter as vazões naturalizadas de cada estação de estudo.

3.6.1. Métodos para naturalização de Vazões

Vazões naturais são aquelas que ocorrem sobre condições específicas de bacias que não incluem impactos humanos ou um baixo nível de atividade ou como vazões observadas em ausência de atividade humanas de captação.

As vazões naturais podem tipicamente serem utilizadas como referência para estimativas hidrológicas como resposta ao regime climático para quantificar o estado ecológico do rio e estimar a quantidade de água disponível

Os métodos de naturalização contribuem para quantificar os impactos antropogênicos nos ecossistemas. Comparando as vazões naturalizadas com as regiões influenciadas nos fornecem maneiras de medir os impactos humanos no ambiente natural ou de influências do clima.

O grau de alteração corresponde à diferença entre a vazão naturalizada e a observada ou a diferença dos indicadores computados nessas vazões.

No entanto vazões naturais no período de pré-influência pode não ser uma representativa das condições climáticas e físicas do período de influência por causa das variabilidades e evoluções naturais. Como consequência podem não ser exploradas como estudos de impactos humanos. Os métodos de naturalização podem tornar possível a separação de impactos resultantes de pressões antropogênicas, sejam locais ou regionais e os impactos causados por mudanças climáticas, e com isso quantificá-los. O impacto humano corresponde a diferença entre as vazões naturalizadas e as observadas no período de influência e o impacto climático corresponde a diferença das vazões naturalizadas no período influenciado e a vazão observada no período anterior.

O pré-requisito para a naturalização é identificar a natureza dos impactos humanos e quantificá-los para determinar quais influências devem ser consideradas no processo de naturalização.

As principais influências antropogênicas são no uso e cobertura do solo, regularização de retiradas e descargas associadas aos diferentes usos da água.

Muitos dos usos influenciam potencialmente os impactos no ciclo da água e direta ou indiretamente afetam as vazões observadas. Na prática muitos são os usos que interferem nas vazões observadas, como atividades industriais, produção de energia, irrigação, atividades recreacionais. A regularização e vazões e retiradas diretas, descargas em rios levam a mudanças na quantidade de água no rio, onde outros impactos de outros componentes no ciclo hidrológico podem levar mais tempo para alterar as vazões naturais. O tempo para observar essas influências é condicionado pela distância entre a fonte do impacto e a estação de captação e os caminhos que a água percorrerá.

O propósito do estudo de naturalização de vazões é produzir uma vazão de referência em rios influenciados e com isto tornar possível obter vazões naturais mesmo em rios

Vazões naturalizadas se referem a uma estimacão da vazão natural sobre condições específicas da bacia que não incluem impactos humanos ou algum baixo nível de desenvolvimento

O período de influência corresponde ao período onde as vazões medidas foram impactadas por influências antropogênicas. Neste período onde não há vazões naturais disponíveis, uma maneira de estimá-las é por meio de métodos de naturalização.

O período de pré-influência serve como condição da bacia e assume que corresponde a um período passado onde as vazões observadas eram livres de impactos de influências antropogênicas que são consideradas nos processos de naturalização. Informações sobre o

período de pré-influência são usadas em diversos métodos de naturalização, no entanto em muitos casos, as datas das medições começaram após as influências e, portanto, não há informações sobre as vazões naturais.

O período de pós-influência corresponde onde as influências na bacia cessaram e as vazões vão a um estado natural que pode ser diferente do período de pré-influência. Este período é relevante e serve como referência se o sistema teve tempo suficiente para retornar ao período sem condições de influência. Obviamente o período de pós influência nas bacias não existem em locais que possuem atividades humanas.

O uso de dados de período de pré e pós influência para estimar os regimes naturais levanta as questões sobre a capacidade de reversibilidade do sistema. Caso cessem as interferências humanas, os rios serão capazes de se recuperar ao estado natural que nunca alcançou caso não tivesse ocorrido atividades humanas? Em alguns casos as atividades humanas estão há tanto tempo que já se tornaram as novas condições da bacia hidrográfica. Teoricamente o período de pré e pós influência tem que coincidir com a interferência na bacia.

O ponto de quebra mais comumente ocorre a mudança significativa estatística nas séries de vazões observadas, mas este ponto pode ter origem antropogênica como urbanizações e construções de reservatórios, pode ser natural como uma mudança morfológica do rio ou pode ser uma variação climática ou até um problema nos dados (medições incorretas, ausência). Com este método é importante destacar que os distúrbios antropogênicos podem existir durante o período definido como pré-influente e que estas influências podem, portanto, impactar as vazões naturalizadas obtidas.

4.0. Área de estudo

A bacia hidrográfica do rio São Francisco, é a segunda maior do Brasil e corresponde a 8% do território nacional. Com uma extensão 2.863 quilômetros de norte a sul com área de drenagem superior a 639.219 km², estende-se desde Minas Gerais, onde o rio nasce, na Serra da Canastra, até o Oceano Atlântico, onde deságua, na divisa dos estados de Alagoas e de Sergipe. Essa vasta área integra as regiões Nordeste e Sudeste do país, percorrendo 505 municípios, em seis estados (Minas Gerais, Goiás, Bahia, Pernambuco, Alagoas e Sergipe), e o Distrito Federal. Constituindo uma das 12 regiões hidrográficas brasileiras (ANA, 2016). A imagem 4.1 mostra a bacia do São Francisco com seus principais rios, dentre eles o São Francisco que dá nome a bacia.



Figura 4.1 - Região Hidrográfica do São Francisco

A bacia foi dividida, para fins de planejamento, em quatro zonas ou regiões fisiográficas: Alto, Médio, Submédio e Baixo São Francisco. A atual divisão também conhecida por nova geografia do São Francisco foi implementada em 2002 pela comissão do Senado Federal, que acompanhava o Projeto de Revitalização do São Francisco e estabeleceu novos limites das regiões fisiográficas do Submédio e Baixo São Francisco com uma linha divisória passando próxima a cidade de Belo Monte (AL). Este limite foi baseado em critérios de homogeneidades geológicos, geomorfológicos, hidrográficos e climáticos (BRASIL, 2003). A tabela 4.1 abaixo mostra a representação da divisão da bacia com suas particularidades

como área, porcentagem da bacia, estados presentes, população e a quantidade de sub-bacias presentes.

Tabela 4.1 - Região Fisiográfica do São Francisco

Região fisiográfica	Área		Unidades da Federação na região fisiográfica	População residente em 2010	N.º sub-bacias
	km ²	% da bacia			
Alto São Francisco	253.291,0	39,8	92,6% Minas Gerais 5,6% Bahia 1,2% Goiás 0,5% Distrito Federal	11.846.908	14
Médio São Francisco	247.518,8	38,9	100,0% Bahia	2.065.925	6
Submédio São Francisco	105.540,5	16,6	59,4% Pernambuco 39,5% Bahia 1,1% Alagoas	2.239.414	9
Baixo São Francisco	29.866,5	4,7	43,9% Alagoas 23,8% Sergipe 22,8% Pernambuco 9,5% Bahia	2.095.123	5

A seguir temos a imagem 4.2 que representa o mapa com as limitações geográficas que mostram a bacia do São Francisco e seus limites com alto, médio, submédio e baixo São Francisco e o rio São Francisco com alguns afluentes.



Figura 4.2 - Divisão da Bacia do São Francisco

Os principais reservatórios existentes no rio São Francisco, para regularização de vazão e/ou geração de energia hidroelétrica, estão: Três Marias, em Minas Gerais, Sobradinho, Paulo Afonso e Itaparica, na Bahia e Xingó, localizado entre os estados de Alagoas e Sergipe. (ANA, 2016)

A água da bacia do rio São Francisco possui diversos usos, sendo a irrigação o mais utilizado. Caso haja uma extração elevada de água, pode haver um comprometimento para eventuais usos como abastecimento, diluição de efluentes, geração de energia, dessedentação de animais e demais finalidades dos rios. Pela irrigação ser o uso que demanda mais água, a retirada da água altera diretamente os valores de vazões que seriam observados em estações fluviométricas, então é necessário obter-se os valores de retiradas para a reconstituição das vazões médias anuais.

Desde 2013, a bacia do rio São Francisco vem enfrentando condições hidrometeorológicas adversas, com vazões e precipitações abaixo da média, com consequências nos níveis de armazenamento dos reservatórios ali presentes. Para preservar os estoques de água, desde abril de 2013, a operação dos reservatórios vem sendo feita de forma especial e com acompanhamento periódico. Num cenário de crescimento da demanda, a preocupação com a garantia de água para os usos múltiplos da bacia repercute-se nas metas, na estratégia e nas diretrizes apresentadas no plano(ANA, 2016).

Como apresenta grande extensão territorial, com área aproximada de 364 mil quilômetros quadrados, e por isso, diversos sistemas meteorológicos se associam para formar diferentes regimes de precipitação ao longo da bacia. Devido majoritariamente a bacia está inserida na região Nordeste do Brasil, majoritariamente na parte semiárida da região, apresenta grande variabilidade espaço-temporal no campo da precipitação, uma vez que essa região possui grande irregularidade temporal e espacial de chuva (MARENGO et al., 2011).

A bacia também tem forte intervenção antrópica. A partir da década de 1950 o vale do São Francisco sofreu grandes transformações devido a construção da represa de Três Marias, implantação e expansão do polo siderúrgico e a industrialização no norte de Minas Gerais. No final da década de 1960, o Alto São Francisco sofreu as grandes alterações no solo. Em particular, o estado de Minas Gerais passou a ser ocupado pela agricultura comercial, por pastagens e atividades de reflorestamento, alterando profundamente a cobertura vegetal original (BRASIL, 2002). E a partir da década de 1980 foram estabelecidos os grandes

projetos de irrigação e as usinas hidrelétricas do médio (Sobradinho), Submédio (Apolônio Sales e Paulo Afonso) e Baixo São Francisco (Xingó e Pão de Açúcar) (FONTES, 2011). A identificação de modos oscilatórios dominantes, não apenas em uma sub-bacia, mas ela como um todo permite conhecer quais as principais escalas de tempo que mais influenciam a variabilidade hidroclimática na bacia tanto temporal quanto espacial e, entender os seus diferentes regimes de precipitação e vazão. O que pode ser de grande valia na otimização dos recursos hídricos. A detecção de tendência auxilia no planejamento das atividades associadas à agricultura de subsistência, por exemplo, e assim na qualidade de vida da população rural.

Ao longo da bacia do São Francisco, estão presentes diversos tipos de biomas, como: floresta atlântica, cerrado, caatinga, costeiros e insulares. O cerrado cobre, praticamente, metade da área da bacia, está presente mais ao sul, de Minas Gerais ao oeste e sul da Bahia, também é conhecido como floresta invertida. Os aquíferos Urucuia e Bambuí abastecem a bacia do São Francisco, contribuindo com a manutenção das vazões médias anuais.

A caatinga predomina no nordeste baiano, onde as condições climáticas são mais severas. Uma porção da floresta atlântica, devastada pelo uso agrícola e pastagens, ocorre no Alto São Francisco, principalmente nas cabeceiras. A vegetação também possui um efeito no ciclo hidrológico e quaisquer mudanças devem incluídas nas medidas anuais de água e energia.

Com a substituição da vegetação nativa por monoculturas como a soja e o pasto utilizado para a alimentação de animais. A soja (principal monocultura) possui raízes rasas e a pecuária compacta o solo com a passagem de animais. Estes dois processos dificultam a infiltração de água no solo e também a recarga de aquíferos, o que pode interferir nas vazões médias.

Aquíferos e rios estão em constante interações. Por vezes rios podem recarregar aquíferos, porém o oposto também pode ocorrer em diferentes períodos do ano. Uso e ocupação do solo na bacia do rio São Francisco

4.1. Uso e ocupação do solo na bacia do São Francisco

A bacia do rio São Francisco possui 342.712 hectares irrigados, sendo que 30% são referentes a projetos públicos. O Médio São Francisco contempla 50% da área de irrigação, 27% no Submédio, 13% no Alto e 10% no Baixo. Na última região, a agricultura de sequeiro e agricultura irrigada como cana-de-açúcar, milho, mandioca, algodão, sisal, banana, abacaxi, fumo, hortaliças e café são as mais praticadas. Nos estados de Alagoas e Sergipe, nas áreas de várzea, há as atividades de piscicultura semi-intensiva associada à pecuária de médio porte (BRASIL, 2004).

A região fisiográfica mais atingidas pela agressão ambiental é o Alto São Francisco com mais de 90 % urbanizada. Nessa região é encontrada o quadrilátero ferrífero, a maior região metropolitana da bacia que é a área mais industrializada. Por outro lado, o Baixo São Francisco apresenta dentre as regiões, a menos urbanizada com 49 % da sub-bacia. O Submédio e o Médio têm 56 % e 55% da área urbanizada, respectivamente (BRASIL, 2004). No Baixo São Francisco, os municípios de Igreja Nova, Coruripe, Junqueiro e Penedo se destacam devido a uma grande parcela na produção regional de açúcar e álcool (IBGE, 2009).

4.2. Vazões médias na bacia do São Francisco

A Bacia do Rio São Francisco por ter grande extensão territorial e múltiplos estágios de desenvolvimento atende praticamente a todas as categorias de uso da água, por isso ela é caracterizada como uma bacia de usos diversos. A vazão natural média do rio é de 2.850 m³/s e, ao longo do ano, a vazão média mensal oscila entre 1.077 m³/s e 5.290 m³/s. As descargas têm seus menores valores nos meses de setembro e outubro e os maiores no primeiro trimestre, sendo que em março são observadas as maiores descargas na bacia. Com relação à vazão regularizada, as barragens de Três Marias e de Sobradinho tem papel fundamental na regularização da vazão na bacia. A barragem de Três Marias fornece uma vazão de 513 m³/s, a jusante e, a partir da barragem de Sobradinho, a vazão regularizada é de 1.815 m³/s (BRASIL, 2004).

Minas Gerais contribui com 2.850 m³/s o que dá 73,9 percentualmente para a vazão média do

rio São Francisco, 20% são tem origem no estado da Bahia, seguido de Pernambuco com 2%, 0,9% de Alagoas, 0,5% de Sergipe e, Goiás e Distrito Federal com 2,1% e 0,6% respectivamente. A vazão média que cada área fisiográfica contribui é a seguinte: 1.184 m³/s do Alto São Francisco, cuja contribuição vem dos rios Pirapora, das Velhas e Jequitáí; 1.446 m³/s do Médio, sendo que o rio Juazeiro é o maior colaborador; 160 m³/s do Submédio e apenas 20 m³/s do Baixo São Francisco.

A vazão média mensal máxima ocorre em fevereiro no Alto, Médio e Submédio São Francisco, com 1.303 m³/s (rio Pirapora), 4.393 m³/s (rio Juazeiro) e 4.660 m³/s (Pão de Açúcar), respectivamente. No Baixo São Francisco, a vazão média máxima ocorre em março com 4.680 m³/s, na Foz. Já a vazão média mínima ocorre em agosto no Alto com 637 m³/s, nas demais áreas acontece em setembro, sendo que, no Médio São Francisco a vazão mínima é verificada no município de Juazeiro sendo de 1.419 m³/s. No Submédio, em Pão de Açúcar é de 1.507 m³/s e no Baixo na Foz, de 1.536 m³/s. A disponibilidade hídrica por habitante por ano da bacia é de 7.024 m³/hab/ano e considerando esse aporte de água por área e sua população, o Médio São Francisco é o que mais contribui com 15.167 m³/hab/ano, apesar de que as sub-bacias com menores contribuições hídricas estejam localizadas nessa região. O Alto São Francisco contribui com 6.003 m³/hab/ano, Baixo com 1.172 m³/hab/ano e o Submédio com 899 m³/hab/ano. Todos os dados são do ano de 2004.

A Companhia Hidro-Elétrica do São Francisco informou mudanças nas operações da Usina Hidro-Elétrica Sobradinho. Na UHE Sobradinho, a partir de sábado 21 de novembro de 2.900 m³/s para 2.600 m³/s. Na UHE Xingó permanecerá a vazões de 2.300 m³/s. (VAZÕES NO SÃO FRANCISCO, 2020)

A medição de vazões em cada rio é feita em estações fluviométricas. A Agência Nacional de Águas realiza medições de vazões em suas estações e é possível obter os dados em seu site. Para isto observamos as estações presentes na área da bacia do São Francisco e por meio de um código baixamos um arquivo no formato desejado, a partir do site Hidroweb, com planilhas contendo vários dados de vazões em cada mês por longos períodos de anos.

4.3. Clima na região Nordeste

Para se entender as mudanças nas vazões, é necessário primeiro conhecer o clima da região na qual a bacia se encontra.

A região Nordeste do Brasil está situada na região Tropical (1-18°S e 35-47°W) deveria ter uma distribuição de precipitação típica de áreas Tropicais. Não obstante, a distribuição de precipitação média anual é muito menor do que se esperaria para uma região equatorial. Na maior parte da região, a precipitação anual é inferior a 800 mm e vai reduzindo à medida que se desloca para o interior, alcançado um valor de 300 mm. Essa má distribuição da precipitação se deve, segundo Moura e Shukla (1981), ao fato da região ficar situada na vizinhança da inversão dos ventos alísios e também de acordo com NIMER (1989) por causa da sua localização geográfica que sofre influência da alta subtropical semipermanente do Atlântico Sul.

O Nordeste Brasileiro possui alta variabilidade espacial na quantidade de precipitação na escala interanual. Partindo da costa até o interior, a diferença da precipitação entre essas duas áreas, pode ser 40% maior na costa da região (MOURA e SHUKLA, 1981; UVO et al., 1998; KOUSKY, 1979). A região tem também como característica a alta variabilidade espaço-temporal da precipitação numa mesma estação chuvosa (MARENGO et al., 2011).

Na parte Leste do Nordeste do Brasil o sistema de alta pressão subtropical do Atlântico Sul tem papel importante na variabilidade interanual da chuva sobre a região, principalmente na estação chuvosa, quando o fluxo tem direção perpendicular à costa e dependendo da posição e intensificação da alta subtropical do Atlântico Sul, a estação chuvosa pode ser fortalecida ou enfraquecida. Outro fenômeno que influencia a precipitação interanual na região são as anomalias de Temperatura da Superfície do Mar do Atlântico (TSM). Rao (1993) verificou que a anomalia da TSM no Atlântico Tropical Sul é altamente correlacionada com a precipitação no leste do Nordeste.

Outro fator contribuinte para a variabilidade da precipitação no Nordeste Brasileiro é o papel dos oceanos Pacífico Tropical Sul e Atlântico. Anos secos ou chuvosos normalmente estão associados à variabilidade da Temperatura da Superfície do Mar do Pacífico Tropical Sul e Atlântico Tropical Norte, as quais influenciam na variabilidade pluviométrica dessa região.

Durante o ano as regiões do planeta estão sujeitas a eventos climáticos extremos e

possivelmente os veremos com mais frequências devido a mudanças climáticas. Alterações climáticas podem ser por motivos naturais ou antrópicos. Essas alterações podem estar associadas com o aquecimento global. De acordo com o painel da ONU, mesmo que se atinjam as metas do aquecimento global, que é elevação de 2 graus na temperatura, as regiões tropicais e subtropicais serão as mais afetadas.

As alterações podem afetar as atividades econômicas locais. Para exemplificar, estima-se que o aumento de um grau na temperatura reduza em 5% a produção de milho.

O planeta Terra é uma biosfera que é um conjunto de biomas que estão diretamente ligados, e por consequência o que ocorre em um bioma, como o desmatamento, pode influenciar outros. Na região amazônica, os rios aéreos formados pela evapotranspiração percorrem grandes distâncias e seu movimento é responsável pelas chuvas em diversas regiões do país e do continente. E assim podemos concluir que a retirada desta cobertura vegetal irá impactar diversas bacias hidrográficas.

O aumento do uso quantitativo da água degradou a água em termos qualitativos ao longo dos últimos anos. Houve mudanças nos sais, salinização de aquíferos de menor profundidade e fertilizantes atingindo outros aquíferos que podem servir de recarga de corpos d'água superficiais. A deterioração da água qualitativamente também interfere nos processos físicos que ela sofre. As concentrações de poluentes na água podem alterar a evaporação, impactar ambientes lóticos e lênticos e outros fatores interferindo no clima.

5.0. Metodologia

Neste capítulo é apresentada a metodologia para atingir os três objetivos específicos apresentados. A quantificação da influência do clima e de alteração na superfície da bacia nas mudanças a longo prazo das vazões de longo período será baseada no método da decomposição baseado das hipóteses de Budyko, mais especificamente na equação de Fu. Este capítulo inicia com uma apresentação de todos os dados a serem empregados no item 5.2.

Na figura 5.1 vemos um fluxograma das atividades a serem realizadas.



Figura 5.1 - Fluxograma das atividades a serem realizadas no estudo da mudança no padrão das vazões média anuais na bacia do São Francisco

Para que a análise possa ser realizada de maneira adequada foi necessário separar a influência da retirada de água para usos consuntivos (usos em que a água é consumida no processo) na bacia e quais advém de influência do clima e das alterações na superfície da bacia (alterações no uso e ocupação do solo). As retiradas afetam as vazões observadas nas estações fluviométricas, por esta razão que se prevê a reconstituição das vazões médias anuais em cada uma das estações fluviométricas senão os resultados obtidos no que concerne à influência do clima e do uso e cobertura do solo seriam distorcidos. O método empregado é neste processo de reconstituição de vazões médias anuais utiliza as estimativas dos usos consuntivos publicadas pela Agência Nacional de Águas (ANA) e apresentadas no item 5.3.1.

A identificação de série de mudanças será feita por meio de métodos estatísticos ou estações que apresentaram saltos abruptos em seus valores observados. Esta etapa resultará em um subconjunto de estações (aquelas que ocorreram mudanças) que posteriormente serão analisadas para compreender o grau de influência do clima e das alterações observadas. A metodologia desta etapa se no método da decomposição que foi apresentada no item 5.3.

5.1. Dados Hidrológicos

Os dados hidrológicos utilizados neste trabalho são os de precipitação e vazão observada, já a evapotranspiração potencial foi obtida com Xavier *et al* (2016, 2017). Os dados de precipitação e vazão utilizados são os de estações pluviométricas e fluviométricas respectivamente e que estão armazenados no Hidroweb da ANA. A seleção dos dados deve obedecer aos seguintes critérios: (1) a estações que não sofreram influência significativa de reservatórios à montante e (2) os registros históricos devem ter pelo menos 30 anos de dados e o mínimo de falhas entre 2000 e 2015 e um mínimo de 15 anos no período de base e 15 anos no período de influência. Os dados de vazão foram obtidos a partir do site Hidroweb da Agência Nacional de Águas enquanto os dados de precipitação foram obtidos a partir do Climate Research Unit (CRU) que é um componente da Universidade do Leste de Anglia (UEA) e os dados de evapotranspiração potencial foram obtidos de Xavier *et al.* (2016, 2017). Para saber quais estações não apresentam reservatórios em sua área de drenagem, foi necessário utilizar os dados de um estudo anterior realizado por Souza (2019, comunicação pessoal) que realizou um cruzamento espacial das áreas de drenagem com massas de água mapeadas anteriormente pela ANA, via interpretação de dados de imagens de satélites em conjunto com identificações de campo. Para cada massa de água identificada na área de drenagem da estação, a data da construção, tipo de operação (regularização ou não), área do espelho e capacidade de armazenamento.

A partir dessas informações foram definidas algumas métricas como: número total de massas d'água, somatório da área das massas d'água em km², percentual da área das massas d'água em relação a área de drenagem da estação, somatório das capacidades ou volumes das massas d'água em hm³ e a relação entre a capacidade das massas d'água e a vazão média de longo termo da estação (Vol/Qmlt). As estações que apresentavam a razão Vol/Qmlt menor ou igual a 0,1 (o volume reservado corresponde a apenas 10% da Qmlt) eram consideradas como região com ausência de reservatórios. Após realizados esses cálculos, Souza (2019,

comunicação pessoal) chegou a 77 estações fluviométricas na bacia do São Francisco sem influência de reservatórios. A figura 5.1 abaixo mostra as estações fluviométricas e suas localizações ao longo da bacia hidrográfica do São Francisco.

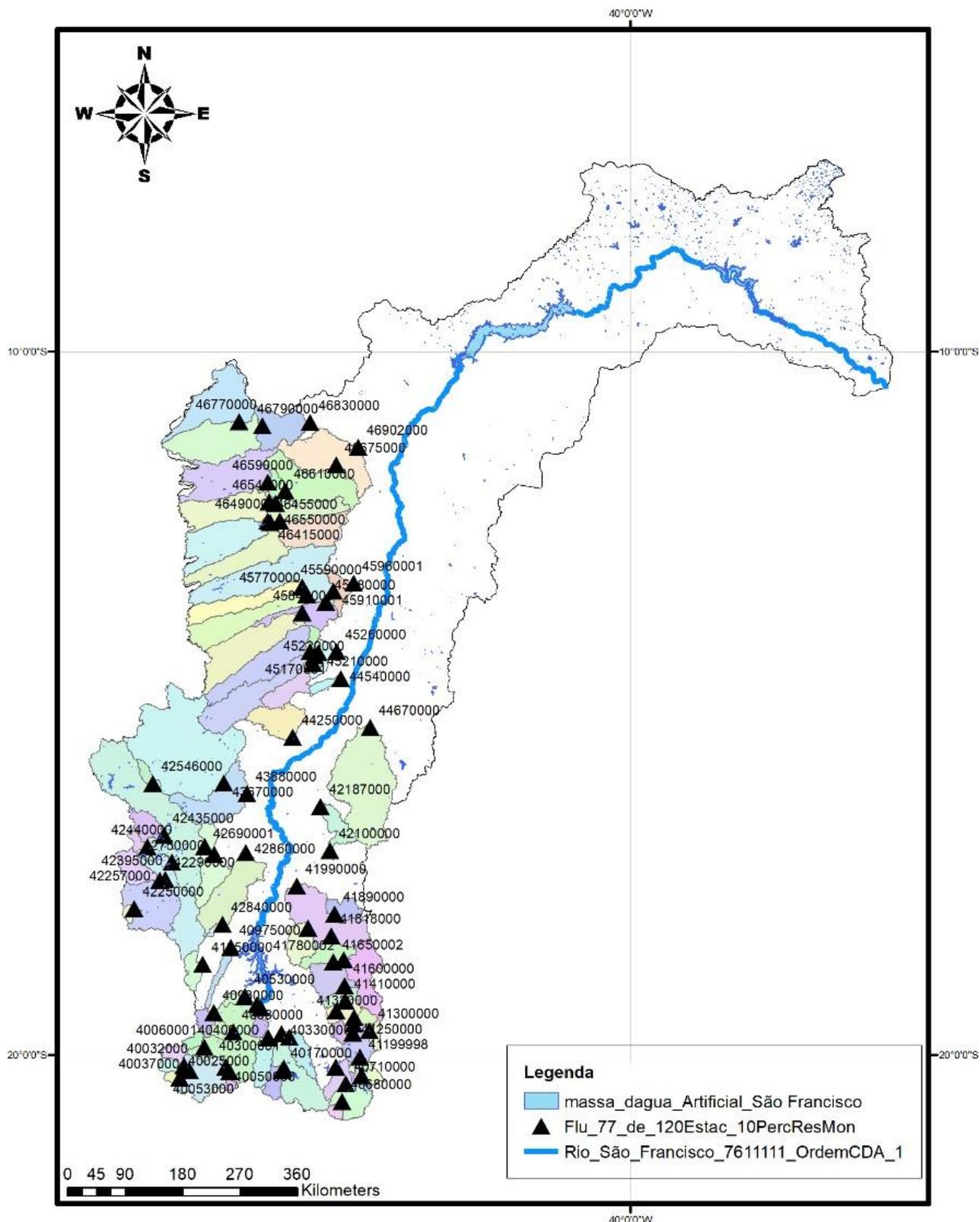


Figura 5.2 - Estações fluviométricas na bacia do São Francisco que não possuem influência de reservatórios e que atendem o critério de tamanho de série histórica.

Os cálculos de precipitação média foram obtidos a partir dos dados de precipitação existentes na bacia do componente de pesquisa da Universidade do Leste Anglia (CRU). Observadas as estações presentes na área, definem-se grades de referências para cada estação fluviométrica de modo a uniformizar espacialmente todos os dados. A uniformização também possibilita avaliações da variabilidade espacial das informações hidrometeorológicas disponíveis. Na figura 5.2 abaixo temos as estações pluviométricas selecionadas distribuídas ao longo da bacia do São Francisco.

Saulo (2019, comunicação pessoal) definiu grades (30 quilômetros cada) e realizou procedimentos de interpolação de modo a levar as informações disponíveis nas estações hidrometeorológicas para os pontos da grade. Para todas as as informações consideradas, o procedimento de interpolação feito utilizou o inverso do quadrado da distância, chamada de IDW, na direção dos centroides da grade. A figura 5.2 abaixo demonstra de forma hipotética, a esquerda, a grade de referência de 30 km pré-definida e, a direita, o procedimento de interpolação IDW. A técnica do IDW foi realizada considerando as 4 estações mais próximas de cada centroide para cada ponto de grade dentro de determinada bacia das estações fluviométricas (técnica comumente denominada de vizinhos mais próximos). Na figura 5.2 abaixo temos as grades de referência.

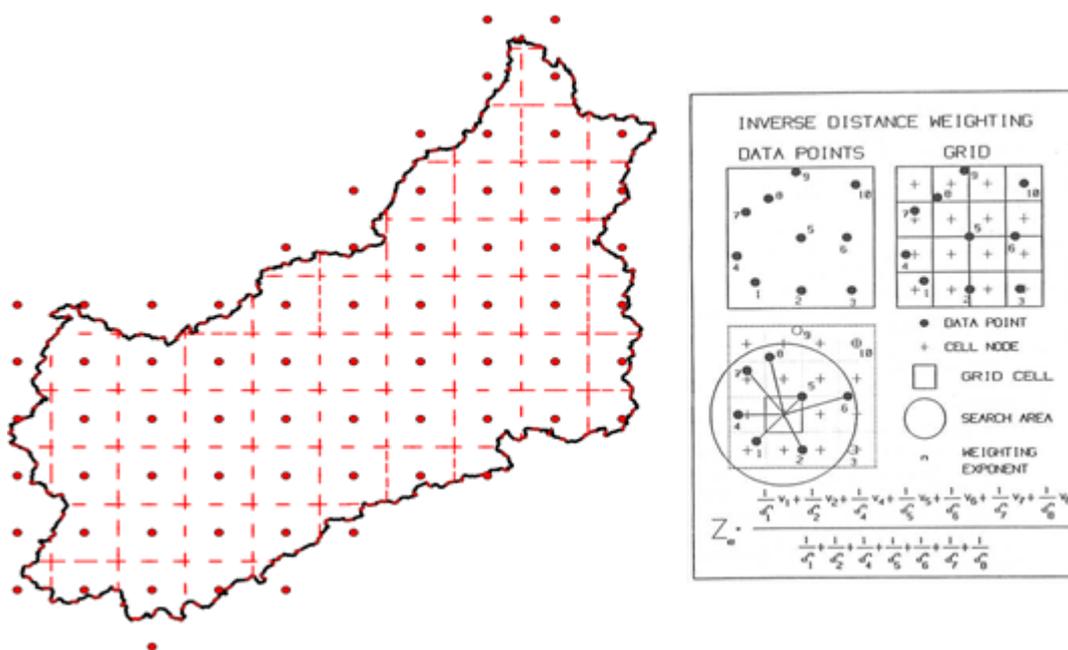


Figura 5.3 - Imagem com as grades de referências de 30 km pré-definidas em cada bacia hidrográfica em cada estações fluviométricas e o esquema que demonstra o procedimento de interpolação IDW (Saulo, comunicação pessoal).

Após a definição dos valores de precipitação em cada ponto de grade, a precipitação média foi obtida pela média ponderada a partir da área de cada grade dentro da bacia de determinada estação fluviométrica. A precipitação média pode ser obtida por uma média ponderada a partir da área de grade pela precipitação em cada estação dentro da bacia.

Os dados de precipitação serão aqueles disponibilizados pelo CRU (Climate Research Unit). O CRU é um componente da Universidade do Leste da Anglia (UEA) cujo objetivo é melhorar o entendimento científico dos sistemas climáticos e suas interações com a sociedade. (ABOUT, 1971). Esta ferramenta fornece dados climáticos de quase todos os lugares do planeta (exceção feita a Antártida) e estão disponíveis em seu site. Para definir a base de dados, os dados de anomalias nas estações (do período de 1961 a 1990) existe um conjunto de informações em grades (células) de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ obtidos em estações climatológicas ao redor do planeta e que foram combinados com a climatologia local para fornecer os valores absolutos mensais de seis variáveis climáticas independentes: Temperatura Média (TMP), Range de temperatura diurna (DTR), precipitação (PRE), frequência de dias úmidos (WET), pressão de vapor (VAP), cobertura de nuvens (CLD). A partir dessas 6 variáveis primárias, foram estimadas as seguintes variáveis secundárias: frequência de dias congelados (FRS), evapotranspiração potencial (ETP). Para o caso da evapotranspiração potencial foi adotada uma variante da equação de Penman- Monteith adotada pela FAO (Food and Agricultural Organization). Esse procedimento é similar ao realizado para o cálculo da precipitação média anual também obtido pela média ponderada a partir da área de cada grade dentro da bacia de determinada estação fluviométrica diferença é que a grade utilizada era da própria Unidade de Pesquisa do Leste da Universidade de Anglia.

Os dados de evapotranspiração real foram obtidos por meio do balanço hídrico. Com as vazões encontradas e reconstituídas, podemos aplicar a equações 3.5 e encontrar todos os valores Evaporação real de cada estação, tanto para o período de base quanto para o período de alterações.

No início possuíamos 152 estações, das quais 102 não possuíam influência de reservatórios. Para o estudo optou-se por utilizar aquelas estações que tinham pelo menos 30 anos com dados, sendo pelo menos 15 no período de base e 15 no período com alterações. Com estes requisitos chegamos a um valor final de 43 estações fluviométricas que foram utilizadas neste estudo.

5.2. Avaliação do momento de mudança nas vazões utilizando o método não-paramétrico de Pettitt

O método de Pettitt considera duas possibilidades, a de que houve mudança em uma série e a de hipótese nula de que não houve mudança. Neste método consideramos uma sequência com distribuição normal. Neste método divide-se a sequência em duas partes, cada um representado por F_1 e F_2 e procura pelo primeiro ponto da segunda série F_2 onde teria ocorrido a mudança. A primeira coluna é formada por cada elemento da subsérie e todas as linhas do primeiro elemento formam a segunda subsérie. Depois fazemos o teste do sinal com cada elemento da primeira subsérie com todos os elementos da segunda subsérie e isto nos fornece o local de mudança que é o primeiro ponto de dados da segunda subsérie. O p-valor nos informa se a mudança foi abrupta ou não, caso este valor seja maior que 0,05.

$$U_{t,n} = U_{t,n-1} + \sum_{j=1}^n \text{sgn}(x_t - x_j)$$

Equação 5.1

$$p = 2e^{-\frac{6(k_n)^2}{n^3+n^2}}$$

Equação 5.2

Para a realização destes cálculos utilizamos novamente o Python juntamente com a biblioteca NumPy, que tem como utilização uma vasta coleção de funções matemáticas para trabalhar com estruturas, para desenvolver o código e aplica-lo nas nossas vazões reconstituídas. Neste estudo utilizamos apenas as estações que não possuíam a influência de reservatório e apresentaram mudanças bruscas no seu intervalo, ou seja, aquelas estações cujo p-valor foi inferior a 0.05. Como resultado, das 152 estações previamente selecionadas, o número foi reduzido para 102 estações sem influência de reservatórios e por fim decidiu-se utilizar apenas as estações que possuíam no mínimo 15 anos de período de base e 15 anos de período de influência. Com isso o número de 102 estações foi reduzido ao valor final de 43 estações. Por meio deste código, aplicamos a cada vazão reconstituída e obtivemos o ponto de mudança em

cada estação. Com este ponto separamos no período pré ou de base ou referência (1) e no período pós, também chamado de período de alteração (2). O período de alteração se inicia no ponto de mudança e se estende até o final da série. Este ponto foi importante para a realização do método da decomposição e posteriormente quantificação da parcela climática e da parcela de uso e ocupação do solo que resultou nas mudanças.

5.3. Método da decomposição

O método da decomposição leva este nome por que tenta separar qual parcela de alterações na bacia é proveniente de alterações climáticas (que podem ou não ser resultado de atividade antrópicas) e qual das mudanças é resultado de alterações no uso do solo.

O método da decomposição leva em consideração médias de longo período de Evapotranspiração e Precipitação e é feito com base nas hipóteses de Budyko. As equações do tipo Budyko tentam levar em conta uma razão entre evapotranspiração e chuvas. O valor de Evapotranspiração sobre Precipitação não pode ser maior que um, pois isso matematicamente falaria que tem mais água passando do estado líquido para o gasoso do que chove. A equação de F_u , que é uma das equações de Budyko é função também de um parâmetro ω que caracteriza o que acontece na bacia propriamente dita. Se o ω permanece o mesmo, mas os valores de Evapotranspiração sobre precipitação mudam, significa que as únicas mudanças que tiveram foram de clima

Para achar os valores de ω para o período de base e o período de mudanças, foram realizados cálculos iterativos com a equação de Budyko, que é a 3.12 deste artigo. Com os valores de E_0 , P e ETP , utilizamos para achar o zero da função, que é o ω . Estes cálculos foram feitos para ambos períodos.

Com os resultados do teste de Pettitt deu-se sequência para quantificar as influências de alterações climáticas na mudança das vazões médias anuais na bacia do São Francisco. O teste

de Pettitt nos forneceu o ano mais provável de variação e o método da decomposição consiste em separar os impactos das alterações no uso e cobertura e das variações climáticas.

Para isto identificamos o ano mais provável de mudança com Pettitt e partir dele, separamos as vazões em dois períodos: 1 que vai do início da série até o ano de mudança e o 2 que é posterior à este ano. Posteriormente calculamos o parâmetro ω para o período antes e posterior das mudanças. O parâmetro ω junto com a evapotranspiração e a precipitação dos dois períodos nos informará o grau de influência do uso e cobertura do solo chamado de ΔQh e do clima, o ΔQc .

O ω é calculado com a razão de evapotranspiração potencial sobre precipitação. Para este trabalho utilizamos os valores médios de evapotranspiração e precipitação do período antes da mudança e do período de pós, obtendo valores para cada estação. O gráfico abaixo nos mostra a evapotranspiração real pela precipitação em função da evapotranspiração real pela precipitação e em função do ω . O ω é um parâmetro exclusivo da bacia

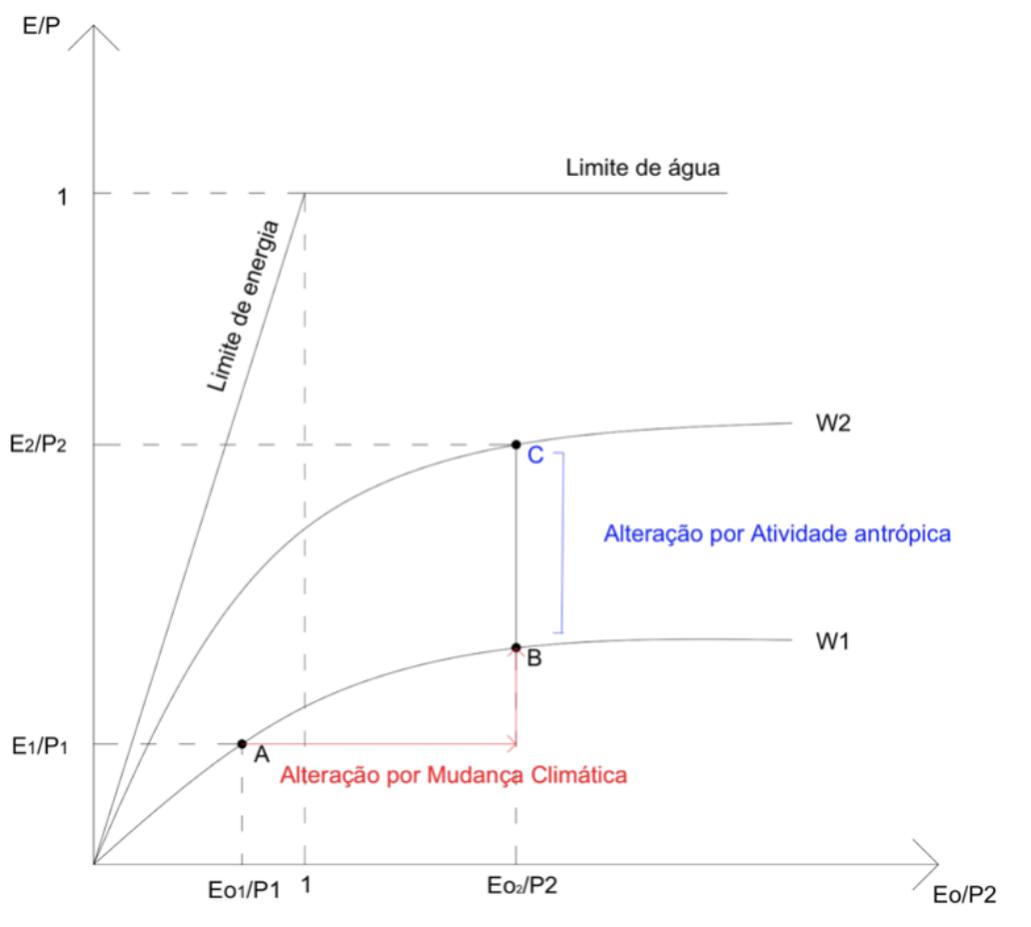


Figura 5.4 - Decomposição ABC (Dorneles, 2018)

A equação 5.3 abaixo é a equação 3.5 dividida pela precipitação.

$$\frac{Q}{P} = 1 - \frac{E}{P}$$

Equação 5.3

Sendo E/P a própria equação de Budyko, que é função do ω .

$$\frac{E}{P} = f\left(\frac{E}{P}, \omega\right) = f(\varphi, \omega)$$

Equação 5.4

Podemos reescrever a equação 5.3 substituindo a equação de Budyko nela.

$$Q = P[1 - f(\varphi, \omega)]$$

Equação 5.5

De acordo com a figura, a variação total da vazão será a diferença de A para C, o componente do clima se trata da variação de A para B e a componente de variações antrópicas se é calculada do ponto B para o C.

$$\Delta Q_{total} = Q_C - Q_A = P_2[1 - f(\varphi_2, \omega_2)] - P_1[1 - f(\varphi_1, \omega_1)]$$

Equação 5.6

$$\Delta Q_C = Q_B - Q_A = Q = P_2[1 - f(\varphi_2, \omega_1)] - P_1[1 - f(\varphi_1, \omega_1)]$$

Equação 5.7

$$\Delta Q_H = Q_C - Q_B = P_2[1 - f(\varphi_2, \omega_2)] - P_2[1 - f(\varphi_2, \omega_1)]$$

Equação 5.8

Sendo $f(\varphi, \omega)$ a equação de fu, foi possível calcular as contribuições do clima e antrópicas de cada estação. Por esta equação ser função do parâmetro ω , encontrou-se este parâmetro por meio da equação 3.12, onde possuíamos os valores de evapotranspiração potencial, evaporação real e precipitação, por meio do Wolfram conseguimos solucionar esta equação que não é resolvida de maneira analítica e encontramos os resultados de ω_1 e ω_2 para cada estação e apresentamos os resultados no item 6.0 com os resultados e as discussões.

6.0. Resultados e discussões

6.1. Reconstituição das vazões

Com a definição dos procedimentos, partimos para os cálculos dos resultados, primeiro para atingir um dos objetivos específicos que é a reconstituição de vazões, para isto foram feitos cálculos de soma das vazões observadas com as vazões retiradas para usos consuntivos. A tabela a seguir nos mostra a vazão média para o período 1, a vazão reconstituída deste mesmo período e o percentual de aumento da vazão reconstituída em relação a vazão observada. Para o período 2 também temos a vazão observada, as vazões reconstituídas e o percentual de aumento da vazão reconstituída para a vazão observada.

Tabela 6.1 - Tabela com as vazões reconstituídas

Código	Q1	Q1 Rec	% de Aumento 1	Q2	Q2 Rec	% de aumento 2
40810800	0,88	0,90	2,86	0,53	0,55	8,06
40811100	1,58	1,65	6,86	0,90	0,97	15,14
41300000	10,33	10,38	1,00	7,14	7,21	2,53
41380000	7,28	7,35	2,02	5,04	5,12	4,39
41685000	3,52	3,56	3,42	1,86	1,90	12,59
41780002	79,51	79,71	0,75	59,63	59,92	1,66
41990000	340,51	345,23	2,86	234,91	241,19	5,69
42187000	6,68	6,90	5,73	3,60	3,84	11,65
42250000	8,98	9,01	0,68	6,26	6,47	7,04
42435000	19,22	19,31	1,11	12,51	12,83	7,02
42546000	8,48	8,50	0,45	5,93	5,97	1,34
42850000	67,17	67,26	0,41	42,77	43,56	6,23
43250002	43,78	43,78	0,97	29,52	29,76	2,64
43300000	53,83	53,98	0,61	36,01	36,75	5,39
43429998	160,35	160,83	0,66	99,60	100,92	4,31
43670000	233,49	234,42	0,87	136,97	140,40	6,64
43880000	290,23	291,41	0,91	164,43	169,42	7,85
44250000	26,67	26,69	0,10	15,57	15,62	0,46
45131000	72,40	72,56	0,29	46,80	47,79	2,68
45170001	64,44	64,62	0,32	45,52	46,46	2,43
45210000	137,11	137,47	0,32	91,05	93,03	2,64
45220000	12,84	13,04	1,77	7,22	7,31	1,70
45260000	148,87	149,88	0,80	99,37	101,63	2,76
45590000	34,64	34,87	0,71	27,38	27,84	1,72
45740001	43,95	44,39	1,16	31,63	32,54	3,17
45770000	58,59	58,83	0,44	45,60	47,30	4,03
45840000	83,06	83,31	0,34	58,85	60,76	3,71
45880000	85,09	85,40	0,42	58,70	60,76	4,05
45910001	227,95	229,21	0,61	169,50	174,10	3,00
45960001	231,34	233,08	0,84	167,33	172,98	3,80
46415000	33,57	34,00	1,50	1,84	23,74	8,62
46455000	51,78	52,67	1,84	40,29	44,65	10,17
46490000	6,29	6,43	2,86	3,75	4,02	8,41
46543000	50,58	51,75	2,61	37,56	40,79	9,23
46550000	92,27	95,25	3,68	65,42	76,17	14,62
46590000	51,74	53,25	3,13	40,30	48,75	17,27
46610000	193,54	198,07	2,63	141,45	159,56	12,48
46650000	192,72	197,28	2,69	144,55	163,26	12,47
46675000	185,52	190,28	2,89	144,03	163,11	12,50
46770000	35,53	35,59	0,18	30,94	31,84	2,70
46790000	100,58	100,78	0,21	86,15	88,28	2,43
46870000	105,35	105,60	0,26	91,92	94,07	2,30
46902000	290,27	295,08	1,87	236,96	256,56	8,26

Observamos que todas as estações tiveram quedas em suas vazões. A estação 41990000 teve redução de 29.17% de sua vazão reconstituída do período 1 para o período 2, sendo uma redução de 105 m³/s. A estação 43880000 teve uma redução de 41.63% de sua vazão. Também podemos constatar que do período de base para o período de mudanças, o percentual de aumento da vazão reconstituída em relação a original aumentava, chegando a 17,27% na estação 46590000 localizada no médio São Francisco na parte oeste da bacia, sendo que no período 1 teve um aumento só de 3.13%. Este aumento na vazão reconstituída do período 1 para o período 2 é um indicativo do aumento das retiradas para usos consuntivos, principalmente para irrigação, visto que as vazões naturalizadas estão se distanciando das vazões observadas.

6.2. Identificação dos períodos de mudança

Com a seleção das estações sem influência de reservatórios, verificamos quais das estações apresentaram mudança nas vazões médias anuais reconstituídas e para isto aplicamos o teste de Pettitt e chegamos a um valor de 43 estações fluviométricas que foram utilizadas neste estudo. Na tabela 6.2 vemos as estações com o ano de mudança.

Tabela 6.2 - Tabela com os anos de mudança nas vazões médias anuais reconstituídas

Estações	Anos	45210000	2001
40810800	1998	45220000	2001
40811100	2006	45260000	2001
41300000	2006	45590000	1996
41380000	1998	45740001	1998
41685000	1998	45770000	2001
41780002	1998	45840000	2001
41990000	1998	45880000	2001
42187000	1995	45910001	1996
42250000	1996	45960001	1996
42435000	1996	46415000	2001

42546000	1995	46455000	1998
42850000	1993	46490000	2001
43250002	1995	46543000	2001
43300000	1995	46550000	2001
43429998	1995	46590000	2001
43670000	1995	46610000	2001
43880000	1995	46650000	2001
44250000	1996	46675000	2001
45131000	2001	46770000	1998
45170001	2001	46790000	2001
		46870000	2001
		46902000	2001

As estações tiveram mudanças em suas vazões no intervalo de anos de 1993 até 2001. Das 43 estações analisadas, 17 estações, ou seja, 43.9% apresentaram mudanças em suas vazões no ano de 2001, sendo então o ano com maior frequência, o segundo ano mais frequente foi 1998, representando 19.5%. No gráfico abaixo vemos quantas estações apresentaram mudanças naqueles anos.

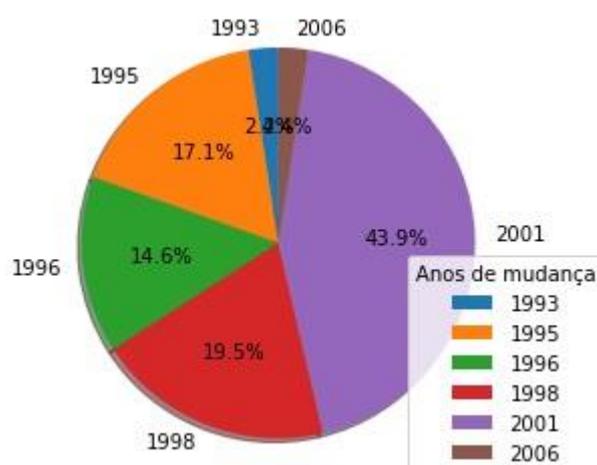


Figura 6.1 - Percentual de anos em que tiveram mudanças nas vazões médias anuais

6.3. Estimativa das influências climática e de uso e cobertura do solo nas bacias

Com as vazões reconstituídas foi possível dar sequência aos cálculos para atingir os objetivos propostos neste estudo. Por meio da equação do balanço hídrico encontramos os valores de Evapotranspiração real e depois utilizamos os valores de evapotranspiração real, precipitação e evapotranspiração potencial e inserimos na equação de fu e obtivemos o parâmetro w tanto para o período de base quanto para o período de alteração. Com o ω encontrado, foi possível aplicar o método da decomposição e estimar o dQ_c e dQ_h que são as influências do clima e do uso e cobertura do solo respectivamente. Com os valores de influência do clima e influência no uso e cobertura do solo, calculamos os seus percentuais de influência em relação a vazão do período de base, o Q1. Os resultados foram apresentados na tabela 6.3 abaixo.

Tabela 6.3 - Tabela com valores de ω , dQ_c e dQ_h

Código	ω 1	ω 2	dQ_c	dQ_h	$dQ_h/Q1$	$dQ_c/Q1(\%)$
40810800	2,9	3,0	-208,2	-8,0	-1,6	-40,2
40811100	3,0	3,4	-182,5	-39,8	-8,7	-39,7
41300000	2,4	2,7	-100,7	-60,8	-11,5	-19,0
41380000	2,6	2,6	-145,3	-6,7	-1,6	-35,4
41685000	3,1	3,8	-56,9	-51,6	-24,6	-27,1
41780002	1,8	2,1	-57,3	-101,2	-16,0	-9,1
41990000	2,3	2,6	-66,0	-61,1	-14,9	-16,1
42187000	3,7	3,2	-256,3	29,8	17,9	-154,2
42250000	2,0	2,3	-55,3	-112,8	-18,4	-9,0
42435000	2,7	3,1	-62,3	-56,6	-14,8	-16,3
42546000	2,3	3,5	139,1	-203,8	-42,0	28,7
42850000	2,2	2,5	-128,7	-63,8	-13,2	-26,6
43250002	2,2	2,7	-5,4	-114,0	-24,9	-1,2
43300000	1,5	2,1	141,6	-259,4	-48,1	26,3
43429998	2,5	2,7	-153,6	-36,0	-8,4	-35,7

43670000	2,5	2,8	-129,3	-53,1	-13,4	-32,5
43880000	2,4	2,8	-125,5	-61,2	-15,9	-32,5
44250000	2,1	3,0	100,1	-139,5	-53,5	38,4
45131000	2,7	2,2	-363,1	81,1	21,3	-95,5
45170001	1,7	1,9	-58,5	-45,7	-13,1	-16,8
45210000	2,4	2,2	-273,3	47,1	13,7	-79,4
45220000	2,7	2,8	-141,4	-11,9	-6,9	-81,9
45260000	2,5	2,3	-233,2	32,1	11,1	-80,4
45590000	2,3	2,3	-55,4	-2,0	-0,7	-19,7
45740001	2,8	2,8	-51,6	-5,6	-3,2	-29,3
45770000	1,9	2,2	32,3	-64,0	-19,1	9,6
45840000	1,8	2,0	-31,5	-63,5	-17,2	-8,5
45880000	2,0	2,3	-6,8	-62,4	-22,1	-2,4
45910001	2,5	2,4	-93,1	8,2	3,3	-38,1
45960001	2,5	2,5	-92,8	4,7	2,0	-39,1
46415000	2,8	2,7	-126,2	15,5	7,2	-58,3
46455000	3,1	2,4	-200,2	85,0	32,5	-76,5
46490000	4,0	4,4	7,6	-8,8	-19,5	16,8
46543000	2,7	2,4	-172,7	62,3	20,6	-56,9
46550000	3,8	3,3	-112,2	31,7	25,7	-91,2
46590000	2,8	2,4	-151,8	56,9	25,3	-67,6
46610000	3,1	2,7	-113,2	35,7	18,9	-60,0
46650000	3,1	2,8	-102,3	34,7	20,1	-59,2
46675000	3,2	2,9	-92,9	31,0	20,5	-61,3
46770000	2,5	3,2	250,0	-97,6	-60,3	154,4
46790000	2,2	2,7	210,8	-97,6	-43,9	94,8
46870000	2,6	2,8	117,4	-35,6	-23,5	77,6
46902000	3,3	2,9	-90,0	35,5	25,1	-63,8

Podemos verificar que em sua maioria o clima exerceu mais influência sobre as vazões que o uso e cobertura do solo. Os valores negativos são referentes a uma influência na diminuição da vazão. Algumas estações como a 42187000, 45210000, 45260000, 45910001, 45960001, 46415000, 46455000, 46543000, 46550000, 46610000, 46650000, 46675000 e 46902000 apresentaram valores positivos de dQ_h , o que é um indicativo de mudança positiva nas vazões, o que pode indicar que estaria influenciando para aumentar

As influências do clima apresentaram no geral maiores valores absolutos, indicando que está exercendo uma influência maior sobre as vazões do período de base. As estações 42546000, 43300000, 44250000, 45770000, 46490000, 46770000, 46790000 e 46870000 apresentaram valores positivos que são um indicativo de influência no sentido de elevar as vazões médias anuais.

No cálculo das estações foram encontrados resultados inconsistentes de algumas estações, que fugiam do padrão encontrado nas demais. Algumas estações com valores extremamente elevados (maiores que 100%) de dQ_c/Q_1 foram descartadas porque concluiu-se que poderiam constar erros em seus dados. Ao final 32 estações (74,41%) tiveram um valor de dQ_c/Q_1 maiores que os valores de dQ_h/Q_1 o que indica que alterações climáticas têm sido mais influentes na mudança nas vazões médias anuais na bacia do São Francisco que a alterações no uso e cobertura do solo.

Com os resultados das influências do clima e do uso e cobertura do solo foi possível produzir um mapa com a localização de cada estação sob influência com seu respectivo percentual. Este mapa auxilia a compreensão de qual localidade está sofrendo mais influência do clima. Este mapa é apresentado abaixo. Na legenda da figura 6.1 está representada a dQ_c/Q_1 em porcentagem, ou seja, o quanto o clima influenciou no período de base na bacia.

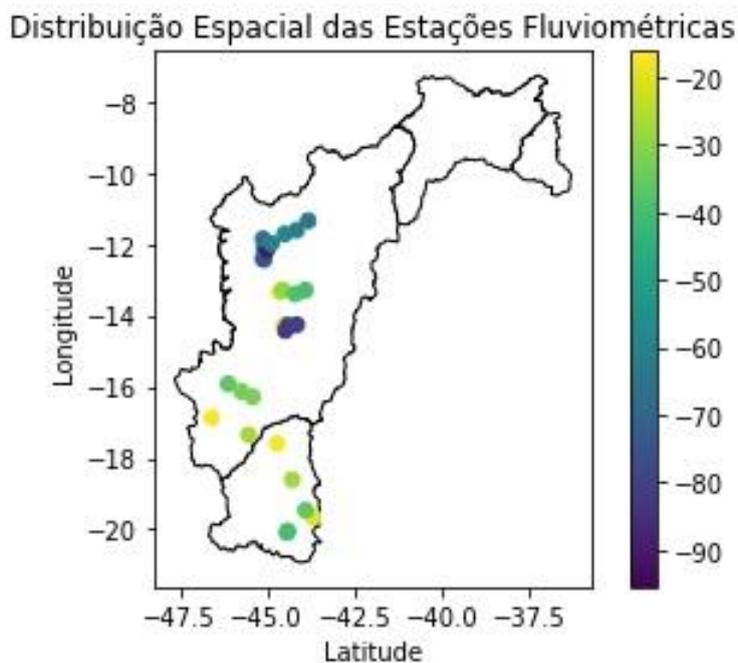


Figura 6.2 - Distribuição espacial das estações e a influência relativa do clima em porcentagem na bacia do São Francisco.

Por meio deste mapa podemos ver que na parte Sul à montante da bacia do São Francisco as influências do clima são menores se comparadas à parte central. A parte do baixo São Francisco e a parte Sul do médio São Francisco possuem influência na faixa 15% até 40% sob as vazões do período de base. Já a parte central que está localizada no médio São Francisco possui influência superior a 40% podendo chegar até a 90%.

Com isto podemos concluir que a área central possui maior influência climática na redução de suas vazões médias anuais.

O clima também exerceu influência sobre as vazões médias anuais na bacia do São Francisco, ainda que em sua maioria em valores menores que o clima, também puderam representar uma parcela significativa em algumas estações, e em várias foi superior às influências climáticas. No mapa abaixo vemos a representação das estações que tiveram valores de dQ_h/Q_1 maiores que os de dQ_c/Q_1 e suas localizações geográficas.

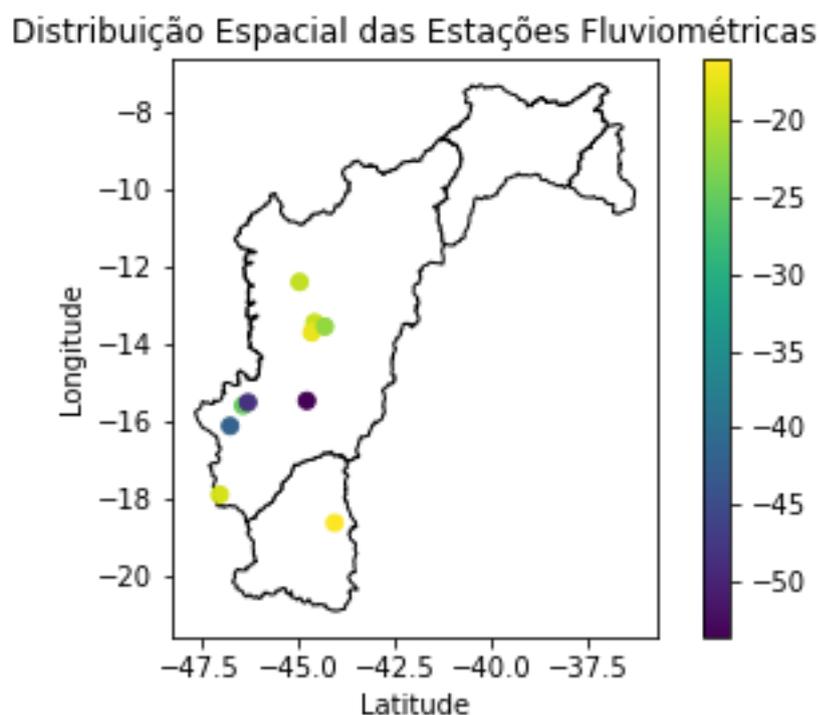


Figura 6.3 - Distribuição espacial das estações com maiores influências relativas de uso e cobertura do solo na Bacia do São Francisco

As estações com maiores influências do uso e cobertura do solo se localizam em regiões próximas àquelas com maiores influências climáticas. Essas estações estão em sua maioria na região do médio São Francisco, apenas uma estação está na região do baixo São Francisco. Apesar de possuir valores percentuais de uso e cobertura do solo menores se comparados aos valores de influências climáticas, ainda tem valores elevados, ultrapassando os 50% de influência na redução das vazões médias anuais. Portanto o uso e cobertura do solo também tem sido significativo na diminuição das vazões na bacia do São Francisco.

A redução nas vazões foi acompanhada de um aumento no índice de aridez, representado pela Evapotranspiração potencial sobre precipitação. Das 43 estações analisadas neste estudo, apenas 6 tiveram reduções nos valores de Evapotranspiração sobre Precipitação para o período de alterações, as outras 37 tiveram aumento. Este aumento no índice de aridez pode auxiliar a explicar porque as vazões reduziram, com o aumento da evapotranspiração acompanhado da redução da evapotranspiração, é esperado que o escoamento superficial reduza. Na figura abaixo vemos a variação de ETP/P para todas as estações. Em azul nos temos os valores de

EPT/P para o período de base, em laranja os valores de ETP/P para o período de influência e em azul a diferença entre os valores de ETP2/P2 e ETP1/P1.

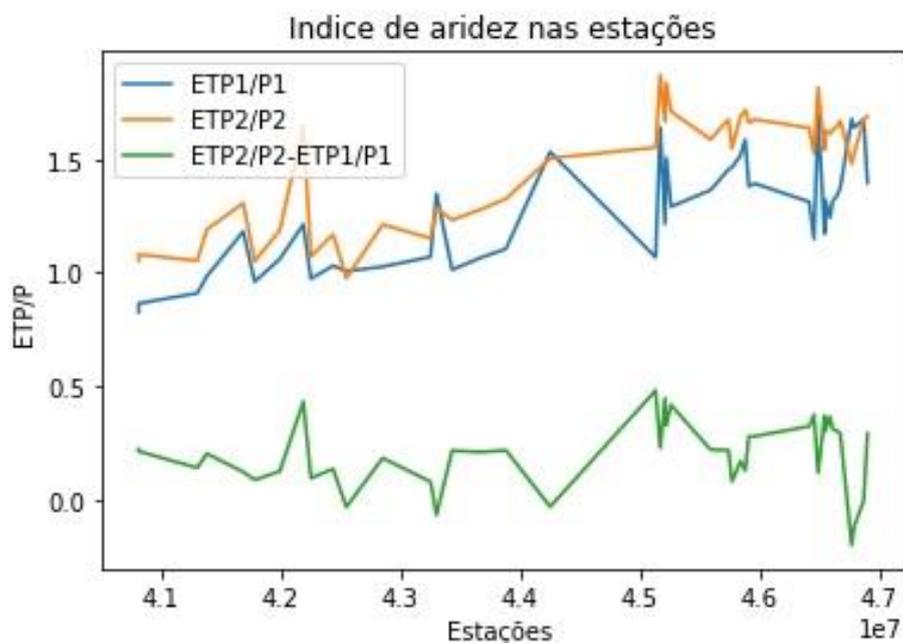


Figura 6.4 - Índice de aridez nas estações

Apenas as estações 42546000, 43300000, 44250000, 46770000, 46790000 e 46870000 apresentaram valores negativos de $ETP2/P2 - ETP1/P1$, o que representa apenas 13% das estações. Todas as outras estações apresentaram elevação nos seus parâmetros.

7.0. Conclusão

No presente estudo foi possível constatar que as vazões médias anuais sofreram mudanças em seus valores originais, chegando até as reduções significativas na casa de 40%.

Durante o estudo também foi possível concluir que as retiradas para usos consuntivos aumentaram bastante no período de mudança em relação ao período de base, o que pode ser

um indicativo de aumento das atividades econômicas que utilizam a água em especial a agricultura, que no nosso país é responsável pela maior parte do consumo de água nos corpos hídricos.

Também foi visto que o fator climático tem sido predominante nas mudanças nas vazões médias anuais na bacia do São Francisco, mas as alterações no uso e cobertura do solo também puderam impactar significativamente em algumas sub-bacias. As modificações climáticas têm impactado a nossa biosfera e com alterações significativas que podem ocasionar circunstâncias que demandem nossa atenção. A redução da disponibilidade hídrica local tem potencial para comprometer atividades econômicas e até mesmo o abastecimento humano. Com as informações sobre como as vazões médias anuais têm se comportado é possível tomar medidas que visem a otimização da gestão e planejamento dos recursos hídricos.

8.0. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA. Plano de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Piancó-Piranhas-Açu. **Ana**, v. 1, n. 1, p. 1–160, 2016.

ANA. **Manual de usos consuntivos da água no Brasil.** [s.l: s.n.].

DOMINGUES, Filipe. **Com mais de 90% da transposição concluída, impactos ambientais no Rio São Francisco ainda são incertos.** [S. l.], 21 dez. 2019. Disponível em: <https://g1.globo.com/natureza/desafio-natureza/noticia/2019/12/21/com-mais-de-90percent-da-transposicao-concluida-impactos-ambientais-no-rio-sao-francisco-ainda-sao-incertos.ghtml>. Acesso em: 26 nov. 2020

DORNELES, Gabriela. **ATRIBUIÇÃO DAS MUDANÇAS NA VAZÃO MÉDIA DE LONGO PERÍODO DEVIDO ÀS ATIVIDADES HUMANAS E ALTERAÇÕES NO CLIMA.**- Universidade de Brasília, [S. l.].

FEDERAL, U. et al. Universidade federal do espírito santo-ufes / dept. de geografia / climatologia. p. 30–49, 2007.

GURJÃO, C. D. DE S.; CORREIA, M. d. F.; FILHO J. B. C.; ARAGÃO, M. R. D. S. Influência do Enos (El Niño-Oscilação Sul) no Regime Hidrológico do Rio São Francisco: uma Análise em Regiões com Fortes Pressões Antrópicas. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 4, p. 774–790, 2012.

HIDROLOGIA. [S. l.], 6 dez. 2020. Disponível em: <https://www.portalsaofrancisco.com.br/meio-ambiente/hidrologia>. Acesso em: 6 dez. 2020.

INÁCIO SILVA, J. R. J. R. I. Silva¹; R. M. S. Souza; W. A. Santos; A. Q. de Almeida; E. S. de Souza; A. C. D. Antonino. Aplicação do método de Budyko para modelagem do balanço hídrico no semiárido brasileiro. **Scientia Plena**, v. 13, n. 10, 2017.

LOPES, Alan Vaz. **AVALIAÇÃO DAS DEMANDAS E OFERTAS HÍDRICAS NA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO USANDO MODELO DE REDE DE FLUXO** Alan. **AVALIAÇÃO DAS DEMANDAS E OFERTAS HÍDRICAS NA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO USANDO MODELO DE REDE DE FLUXO**, [S. l.], p. 1-9, 7 dez. 2020.

LOPES, Z. F. Detecção de Mudança Hidroclimática na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. **PhD Proposal**, v. 1, p. 1–171, 2014.

MELLO, L. E ; OLIVEIRA, A. F.; PRUSKI F. F.; C. FIGUEIREDO, C. J. Efeito das

mudanças climáticas na disponibilidade hídrica da bacia hidrográfica do Rio Paracatu. **Engenharia Agrícola**, v. 28, n. 4, p. 635–644, dez. 2008.

MILLER, M. P; CARLISLE M. C.; WOLOCK M. D.; WIECZOREK M. Um banco de dados de estimativas de fluxo de fluxo mensal natural de 1950 a 2015 para os Estados Unidos conterminous. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 54, n. 6, p. 1258-1269, 2018.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO; CONSÓRCIO FAHMA/ DREER (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO E DA FAHMA/DZETA CONSORTIUM). Estimativa das vazões para atividades de uso consuntivo da água em bacias do Sistema Interligado Nacional - SIN: Relatório Final - Metodologia e Resultados Consolidados. p. 220, 2005.

OTSUKI, R. G. Estimativa de séries anuais de evapotranspiração real e vazão em bacias sem monitoramento fluviométrico com base nas hipóteses de Budyko. p. 121, 2015.

SAMPAIO, T.; CONCHY, X. HIDROLOGIA NUMA PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO AMAZÔNICA. p. 1–70, 2018.

SCANLON, B. R.; JOLLY, I.; SOPHOCLEUS, M; ZHANG, L. Impactos globais das conversões de ecossistemas naturais para agrícolas sobre recursos hídricos: Quantidade versus qualidade. **Busca de Recursos Hídricos**, v. 43, n. 3, 2007.

SPOSITO, G. Entendendo a equação de budyko. **Água (Suíça)**, v. 9, n. 4, p. 1-14, 2017.

TUCCI, Carlos E. M. **Casos de incertezas nos dados hidrológicos**. [S. l.], 15 dez. 2017. Disponível em: <http://rhama.com.br/blog/index.php/hidrologia/incertezas-nos-dados-hidrologicos-casos/>. Acesso em: 2 dez. 2020.

TUCCI, Carlos E. M. **Ecohidrologia**. [S. l.], 22 fev. 2009. Disponível em: <http://rhama.com.br/blog/index.php/hidrologia/ecohidrologia/>. Acesso em: 24 nov. 2020.

TUCCI, Carlos E. M. **Efeito da variabilidade climático e uso do solo: energia**. [S. l.], 27 set. 2008. Disponível em: <http://rhama.com.br/blog/index.php/sem-categoria/efeito-da-variabilidade-climatica-e-uso-do-solo-energia/>. Acesso em: 1 dez. 2020.

TUCCI, Carlos E. M. **Hidrologia: uma ciência em transformação III**. [S. l.], 23 mar. 2013. Disponível em: <http://rhama.com.br/blog/index.php/hidrologia/hidrologia-uma-ciencia-em-transformacao-iii/>. Acesso em: 2 dez. 2020.

VAZÕES no São Francisco: redução em Sobradinho, Xingó sem mudanças. [S. l.]: REDAÇÃO INFOSÃOFRANCISCO, 20 nov. 2020. Disponível em: <https://infosaofrancisco.canoadetolda.org.br/saneamento/vazoes-no-sao-francisco-reducao-em-sobradinho-xingo-sem-mudancas/>. Acesso em: 25 nov. 2020.

VILLELA, LUCIA MARIA AVERSA. AVALIAÇÃO DAS DEMANDAS E OFERTAS HÍDRICAS NA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO USANDO MODELO DE REDE DE O FLUXO. *Journal of Chemical Information and Modeling*, v. 53, n. 9, p. 1689-1699

Xavier, A.C.; King, C.W.; Scanlon, B.R. Daily Gridded Meteorological Variables in Brazil (1980-2013): DAILY GRIDDED METEOROLOGICAL VARIABLES IN BRAZIL(1980-2013). *Int. J. Climatol.* **2016**, 36, 2644–2659.

Xavier, A.C.; King, C.W.; Scanlon, B.R. An Update of Xavier, King and Scanlon (2016) Daily Precipitation Gridded Data Set for the Brazil. In Proceedings of the Proceedings of the XVIII Brazilian Symposium on Remote Sensing; Gherardi, D.F., Aragão, L.E., Eds.; Santos/SP, 2017.

