

Université de Montréal

**Modélisation spatio-temporelle de l'évolution de la dengue en lien avec des prédicteurs environnementaux dans le département de Méta en Colombie entre 2011 et 2019**

Par  
Rawda Berkat

Département de Médecine Sociale et Préventive, École de santé publique

Mémoire présenté à l'École de Santé Publique de l'Université de Montréal  
en vue de l'obtention du grade de Maîtrise (M. Sc.) en épidémiologie

Décembre 2022

© Rawda Berkat, 2022

Université de Montréal

Département de Médecine Préventive et Sociale - École de santé publique

---

*Ce mémoire intitulé*

**Modélisation spatio-temporelle de l'évolution de la dengue en lien avec des prédicteurs  
environnementaux dans le département de Méta en Colombie entre 2011 et 2019**

*Présenté par*  
**Rawda Berkat**

*A été évalué(e) par un jury composé des personnes suivantes*

**Anita Koushik**  
Présidente-rapporteuse

**Bouchra Nasri**  
Directrice de recherche

**Kate Zinszer**  
Co-directrice de recherche

**Nadia Sourial**  
Membre du jury

## Résumé

**Contexte :** La dengue est une fièvre ayant pris davantage d'ampleur dans plusieurs régions du monde à climat tropical, dont le département Méta en Colombie, un lieu endémique dans la dernière décennie. Sachant que la propagation de cette maladie est entièrement dépendante des sites de reproduction du vecteur de transmission *Aedes*, l'investigation de prédicteurs environnementaux les affectant nous semblait pertinente d'un point de vue épidémiologique. Notre étude vise des retombées sur un plan de surveillance de santé publique et l'élaboration de programmes basés sur des observations temporelles et spatiales.

**Objectifs :** Décrire la distribution spatio-temporelle de la dengue dans les 29 municipalités de Méta selon des prédicteurs environnementaux, soit les précipitations, la température ambiante, la température du point de rosée et la pression au niveau de la mer dans le cadre d'une étude écologique.

**Méthodes :** Des données de surveillance SIVIGILA, de télédétection ainsi que de recensement DANE des 29 municipalités du département de Méta entre 2011 et 2019 ont été utilisées pour étudier l'association entre la dengue et les prédicteurs environnementaux. La modélisation de ces associations a été effectuée à l'aide d'un modèle de Markov cachés à changement de régime.

**Résultats :** Des associations positives importantes ont été détectées entre les précipitations et l'incidence de la dengue atteignant des risques relatifs élevés (RR=1.97 à El Calvario à un décalage de 5 semaines ; RR=1.61 à San Juanito à un décalage de 20 semaines). La température ambiante et la température du point de rosée ont suivi en matière de pertinence n'excédant pas des RR de 1.11 pour la maladie. Or, la pression au niveau de la mer n'a pas présenté des résultats concluants. Selon les différents aspects étudiés dans les nombreuses cartes de ce mémoire, nous avons observé une dépendance géographique répétée à l'ouest du département.

**Conclusion :** Nos conclusions recommandent qu'une attention particulière de la santé publique doit s'imposer quant à la prévention de la dengue en saison pluvieuse dans le Meta. Les hausses des valeurs de température ambiante et de la température du point de rosée peuvent expliquer certaines augmentations de l'incidence et incitent donc à la surveillance de ces paramètres également. À noter que nos résultats ont possiblement pu être influencés par un biais d'information et un biais de confusion.

**Mots-clés :** Dengue, modélisation spatio-temporelle, Meta, température ambiante, température du point de rosée, précipitation, pression au niveau de la mer

## Abstract

**Context:** Dengue is a type of fever that has significantly spread in several regions of the world characterized by a tropical climate, including the Meta department in Colombia, which seemed to be an endemic place in the last decade. Knowing that the spread of this disease is entirely dependent on the reproduction sites of the *Aedes* transmission vector, the study of environmental predictors affecting those sites seemed relevant from an epidemiological point of view. Our study aims to add to the knowledge that can be used for public health surveillance and program elaboration based on temporal and spatial observations of dengue patterns within the region.

**Objectives:** To describe the spatiotemporal distribution of dengue fever in the 29 municipalities of Meta according to its environmental predictors (i.e. precipitation, ambient temperature, dew point temperature and pressure at sea level) within the framework of an ecological study.

**Methods:** SIVIGILA surveillance, remote sensing and DANE census data from 29 municipalities in the Meta department between 2011 and 2019 were used to study the association between dengue fever and environmental predictors. These associations were modeled using a regime-switching hidden Markov model.

**Results:** Significant positive associations were detected between rainfall and dengue incidence reaching high relative risks (RR=1.97 in El Calvario at a 5-week lag; RR=1.61 in San Juanito at a 20-week lag). Ambient temperature and dew point temperature followed in terms of relevance not exceeding RRs of 1.11 for disease. However, pressure at sea level did not show conclusive results. According to the different aspects studied in the many geographical maps of this thesis, we observed a repeated geographical dependence in the west of the department.

**Conclusion:** We recommend that special public health attention should be given to the prevention of dengue fever in the rainy season in Meta. Increases in ambient temperature values and dew point temperature may explain some increases in incidence and therefore prompt monitoring of these parameters as well. It should be noted that our results may have been influenced by an information bias and confusion bias.

**Keywords:** Dengue fever, spatiotemporal modelling, Meta, ambient temperature, dew point temperature, precipitation, pressure at sea level.



# Table des matières

RESUME .....	II
ABSTRACT .....	III
LISTE DES TABLEAUX .....	VI
LISTE DES FIGURES .....	VII
LISTE DES ABREVIATIONS .....	XIII
REMERCIEMENTS .....	XV
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 2 : RECENSION DES ECRITS .....	3
2.1 SIGNES ET SYMPTOMES .....	4
2.2 DIAGNOSTIC ET TRAITEMENT .....	5
2.3 <i>Aedes</i> , LE VECTEUR A LA SOURCE .....	6
2.4 FACTEURS EXTRINSEQUES A LA TRANSMISSION .....	7
2.4.1 <i>Facteurs environnementaux et climatiques</i> .....	7
2.4.2 <i>Facteurs socioéconomiques et sociodémographiques</i> .....	10
2.5 PREVENTION .....	12
2.6 SURVEILLANCE DE LA MALADIE .....	13
2.7 LA COLOMBIE ET LA DENGUE .....	16
2.8 METHODES STATISTIQUES SPATIO-TEMPORELLES .....	19
2.9 SOMMAIRE DE RECENSION ET FORMULATION DE LA QUESTION DE RECHERCHE.....	22
2.10 OBJECTIFS DE RECHERCHE .....	23
CHAPITRE 3 : DONNEES ET METHODOLOGIE .....	24
3.1. DEVIS D’ETUDE .....	24
3.2 POPULATION A L’ETUDE .....	24
3.3 CONCEPTUALISATION DES VARIABLES ET SOURCE DES DONNÉES .....	25
3.3.1 <i>Variable d’issue</i> .....	25
3.3.2.....	26
<i>Variables prédictives</i> .....	26
3.4 ANALYSES DES DONNEES ET MODELISATION .....	27
3.4.1 <i>Analyse descriptive</i> .....	27
3.4.2 <i>Modélisation des données</i> .....	29
CHAPITRE 4 : RESULTATS .....	32
4.1 OBJECTIF 1 .....	32
4.1.1 <i>Données sur la dengue</i> .....	32
4.1.2 <i>Données environnementales</i> .....	45
4.2 OBJECTIF 2 .....	75
4.2.2 <i>Analyses graphiques du risque</i> .....	84
4.2.3 <i>Analyses du risque par carte géographique</i> .....	96
CHAPITRE 5 : DISCUSSION.....	104
5.1 SOMMAIRE DES RESULTATS .....	104
5.1.1 <i>Objectif 1</i> .....	104
5.1.2 <i>Objectif 2</i> .....	106
5.2 FORCES .....	107
5.3 LIMITES ET SOURCES DE BIAIS .....	108

5.3.1 <i>Biais d'information</i> .....	108
5.3.2 <i>Biais de confusion</i> .....	109
5.3.3 <i>Validité externe</i> .....	109
5.4 RETOMBÉES DE L'ÉTUDE ET PISTES FUTURES .....	110
<b>CHAPITRE 6 : CONCLUSION</b> .....	<b>112</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....	<b>113</b>
<b>ANNEXE B. LISTE DES MUNICIPALITÉS DU DÉPARTEMENT META</b> .....	<b>131</b>
<b>ANNEXE C. PUISSANCE DES TESTS</b> .....	<b>132</b>
<b>ANNEXE D. DESCRIPTION DÉTAILLÉE DE LA MÉTHODOLOGIE</b> .....	<b>134</b>

## Liste des tableaux

**Tableau 1.** Coûts moyens (en dollar américain) en matière de santé liée à une infection dengue selon les différents stades pour un ménage en Colombie en 2012

**Tableau 2.** Méthodes d'analyses spatio-temporelles d'études antérieures portant sur la dengue

**Tableau 3.** Prédicteurs utilisés dans l'analyse spatio-temporelle d'études antérieures

**Tableau 4.** Sommaire des périodes où les valeurs faibles et les valeurs élevées sont atteintes pour les variables prédictives

## Liste des Figures

**Figure 1.** Incidences cumulées annuelles en Colombie pour les années 1998, 2002, 2010, 2013 et 2019 rapportées par Gutierrez et al.<sup>4</sup>.

**Figure 2.** Carte géographique des municipalités du département de Méta en Colombie avec la proportion de la population de chacune d'entre elles.

**Figure 3.** HMM avec deux régimes 1 et 2 et une matrice de transition composée des éléments  $Q_{11}$ ,  $Q_{22}$  qui représentent respectivement les probabilités de rester dans le régime 1 et 2. Et  $Q_{12}$  et  $Q_{21}$  qui représentent les probabilités des transitions d'un régime à l'autre. Les observations dans un temps  $t$  se classifient dans un régime spécifique et ont une distribution spécifique. Supposant que nous considérant un modèle HMM avec distribution Poisson et deux régimes, les observations vont se classifier selon le régime 1 ou 2 et suivront des distributions de Poisson avec différents paramètres.

**Figure 4.** Graphique illustrant l'évolution de l'incidence cumulée (IC) agrégée de dengue dans l'ensemble du département Meta entre 2011 et 2019.

**Figure 4.** Boîtes à moustaches représentant la distribution de l'incidence cumulée de la dengue pour quatre périodes annuelles des années 2011 à 2019 combinées à travers le département de Méta.

**Figure 6.** Cartes géographiques des incidences (IC) cumulées annuelles pour l'ensemble des municipalités du département Méta entre 2011 et 2019

**Figure 7.** Décomposition de la série temporelle additive de la municipalité de (a) La Macarena, (b) San Luis de Cubarral, (c) Restrepo, (d) El Calvario, (e) San Juanito et (f) San Carlos de Guaroa représentant l'incidence de la dengue à travers les années à l'étude (2011-2019).

**Figure 8.** Cartes géographiques illustrant la tendance de la pente entre (a) 2016-2019, (b) 2017-2019, (c) 2011-2015 et (d) 2011-2016 de chaque municipalité du département de Méta.

\*Le gradient de couleur indique la pente de la tendance de l'incidence de la dengue dans chaque municipalité dans les années en question. Une pente positive indique une croissance et une pente négative indique une décroissance.

**Figure 9.** Série chronologie présentant la saisonnalité des données de dengue des différentes municipalités du département Méta entre les années 2013 et 2016.

**Figure 10.** Cartes géographiques illustrant la distance de la moyenne des points (a) minimaux et (b) maximaux par rapport à la médiane du département (2011-2019)\* et le semaine d'atteinte des valeurs (c) minimales et (d) maximales de la saisonnalité (2011-2019)\*\* de chaque municipalité du département de Méta.

\*Le gradient de couleur indique la différence entre la médiane globale et la moyenne des valeurs minimales ou maximales de chaque municipalité. Plus la valeur est élevée, plus la municipalité diffère du reste du département.

\*\*Le gradient de couleur, variant de 0 à 50, indique les semaines dans lesquelles les points minimaux et maximaux de l'incidence de la dengue sont atteints.

**Figure 11.** Boîtes à moustaches représentant la distribution des précipitations hebdomadaires moyennes pour quatre périodes annuelles des années 2010 à 2019 combinées à travers le département de Méta.

**Figure 12.** Boîtes à moustaches représentant la distribution de la température ambiante hebdomadaire moyenne pour quatre périodes annuelles des années 2010 à 2019 combinées à travers le département de Méta.

**Figure 13.** Boîtes à moustaches représentant la distribution de la température du point de rosée hebdomadaire moyenne pour quatre périodes annuelles des années 2010 à 2019 combinées à travers le département de Méta.

**Figure 14.** Boîtes à moustaches représentant la distribution de la pression moyenne hebdomadaire au niveau de la mer pour quatre périodes annuelles des années 2010 à 2019 combinées à travers le département de Méta.

**Figure 15.** Cartes géographiques illustrant la période comptant les précipitations (a) les plus élevées, période de mai à juillet, et (b et c) les plus basses, période d'août à octobre ou novembre à décembre, basées sur des valeurs moyennes à travers le département de Méta de 2010 à 2019.

**Figure 16.** Cartes géographiques illustrant la période comptant les températures ambiantes (a) les plus élevées, période de janvier à avril, et (b) les plus basses, période de mai à juillet, basées sur des valeurs moyennes à travers le département de Méta de 2010 à 2019.

**Figure 17.** Cartes géographiques illustrant la période comptant les températures du point de rosée (a) les plus élevées, période de mai à juillet, et (b) les plus basses, période de janvier à avril, basées sur des valeurs moyennes à travers le département de Méta de 2010 à 2019.

**Figure 18.** Cartes géographiques illustrant la période comptant les pressions au niveau de la mer (a) les plus élevées, période de mai à juillet, et (b) les plus basses, période de novembre à décembre, basées sur des valeurs moyennes à travers le département de Méta de 2010 à 2019.

**Figure 19.** Décomposition de la série temporelle additive de la municipalité de (a) Barranca De Upia, (b) San Luis de Cubarral, (c) Fuente de Oro, (d) Mapiripan, (e) La Macarena représentant les précipitations moyennes totales hebdomadaires (en mm) à travers les années à l'étude (2010-2019).

**Figure 20.** Cartes géographiques illustrant la tendance de la pente des précipitations moyennes hebdomadaires entre (a) 2016-2019, (b) 2017-2019, (c) 2010-2015 et (d) 2010-2016 de chaque municipalité du département de Méta.

\*Le gradient de couleur indique la pente des valeurs des précipitations moyennes hebdomadaires de chaque municipalité. Les pentes positives, illustrées par des tons de bleus, démontrent une croissance, tandis que les pentes négatives, illustrées par des tons de gris, indiquent une décroissance.

**Figure 21.** Représentation de la saisonnalité entre 2017 et 2019 pour la covariable de précipitations hebdomadaires moyennes dans les municipalités de (a) Villavicencio, (b) Mapiripan, (c) Mesetas et (d) Puerto Lleras du département de Méta.

**Figure 22.** Cartes géographiques illustrant la distance de la moyenne des points (a) maximaux et (b) minimaux par rapport à la médiane du département (2010-2019)\* et la semaine d'atteinte des valeurs (c) maximales et (d) minimales de la saisonnalité (2010-2019)\*\* pour la saisonnalité de la covariable de précipitations de chaque municipalité du département de Méta.

\*Le gradient de couleur indique la différence entre la médiane globale et la moyenne des valeurs minimales ou maximales de chaque municipalité. Plus la valeur est élevée, plus la municipalité diffère du reste du département.

\*\*Le gradient de couleur indique les semaines où les points minimaux et maximaux des précipitations sont atteints.

**Figure 23.** Décomposition de la série temporelle additive de la municipalité de (a) Villavicencio, (b) Fuente de Oro, (c) San Juanito et (d) Vistahermosa représentant les températures ambiantes moyennes hebdomadaires (en °C) à travers les années à l'étude (2010-2019).

**Figure 24.** Cartes géographiques illustrant la tendance de la pente pour la covariable de température ambiante moyenne hebdomadaire entre (a) 2016-2019, (b) 2017-2019, (c) 2010-2015 et (d) 2010-2016 de chaque municipalité du département de Méta.

\*Le gradient de couleur indique la pente des valeurs des températures ambiantes moyennes hebdomadaires de chaque municipalité. Les pentes positives, illustrées par des tons de bleus, démontrent une croissance, tandis que les pentes négatives, illustrées par des tons de gris, indiquent une décroissance.

**Figure 25.** Représentation de la saisonnalité entre 2017 et 2019 pour la covariable de températures ambiantes hebdomadaires moyennes dans certaines municipalités du département de Méta.

**Figure 26.** Cartes géographiques illustrant la distance de la moyenne des points (a) maximaux et (b) minimaux par rapport à la médiane du département (2010-2019)\* et la semaine d'atteinte des valeurs (c) maximales et (d) minimales de la saisonnalité (2010-2019)\*\* pour la saisonnalité de la covariable de la température ambiante moyenne hebdomadaire de chaque municipalité du département de Méta.

\*Le gradient de couleur indique la différence entre la médiane globale et la moyenne des valeurs minimales ou maximales de chaque municipalité. Plus la valeur est élevée, plus la municipalité diffère du reste du département.

\*\*Le gradient de couleur indique les semaines où les points minimaux et maximaux de la température ambiante moyenne hebdomadaire sont atteints.

**Figure 27.** Décomposition de la série temporelle additive de la municipalité de (a) Acacias et (b) Mapiripan représentant la température du point de rosée moyenne hebdomadaire (en °C) à travers les années à l'étude (2010-2019).

**Figure 28.** Cartes géographiques illustrant la tendance de la pente entre (a) 2016-2019, (b) 2017-2019, (c) 2010-2015 et (d) 2010-2016 de chaque municipalité du département de Méta.

\*Le gradient de couleur indique la pente des valeurs des températures du point de rosée moyennes hebdomadaires de chaque municipalité. Les pentes positives, illustrées par des tons de bleus, démontrent une croissance, tandis que les pentes négatives, illustrées par des tons de gris, indiquent une décroissance.

**Figure 29.** Représentation de la saisonnalité entre 2017 et 2019 pour la covariable de température du point de rosée hebdomadaire moyenne à (a) San Carlos De Guaroa et (b) San Juanito.

**Figure 30.** Cartes géographiques illustrant la distance de la moyenne des points (a) maximaux et (b) minimaux par rapport à la médiane du département (2010-2019)\* et la semaine d'atteinte des valeurs (c) maximales et (d) minimales de la saisonnalité (2010-2019)\*\* pour la saisonnalité de la covariable de la température du point de rosée moyenne hebdomadaire de chaque municipalité du département de Méta.

\*Le gradient de couleur indique la différence entre la médiane globale et la moyenne des valeurs minimales ou maximales de chaque municipalité. Plus la valeur est élevée, plus la municipalité diffère du reste du département.

\*\*Le gradient de couleur indique les semaines où les points minimaux et maximaux de la température du point de rosée moyenne hebdomadaire sont atteints.

**Figure 31.** Décomposition de la série temporelle additive de la municipalité d'Acacias représentant la pression moyenne hebdomadaire au niveau de la mer (en Pa) à travers les années à l'étude (2010-2019).

**Figure 32.** Cartes géographiques illustrant la tendance de la pente de la covariable de la pression au niveau de la mer moyenne hebdomadaire entre (a) 2016-2019, (b) 2017-2019, (c) 2010-2015 et (d) 2010-2016 de chaque municipalité du département de Méta.\*

\*Le gradient de couleur indique la pente des valeurs de la pression moyenne hebdomadaire au niveau de la mer de chaque municipalité. Les pentes positives, illustrées par des tons de bleus, démontrent une croissance, tandis que les pentes négatives, illustrées par des tons de gris, indiquent une décroissance.

**Figure 33.** Représentation de la saisonnalité entre 2017 et 2019 pour la covariable de la pression moyenne hebdomadaire au niveau de la mer dans la municipalité de San Luis de Cubarral.

**Figure 34.** Cartes géographiques illustrant la distance de la moyenne des points (a) maximaux et (b) minimaux par rapport à la médiane du département (2010-2019)\* et la semaine d'atteinte des valeurs (c) maximales et (d) minimales de la saisonnalité (2010-2019)\*\* pour la saisonnalité de la covariable de la pression moyenne hebdomadaire au niveau de la mer de chaque municipalité du département de Méta.

\*Le gradient de couleur indique la différence entre la médiane globale et la moyenne des valeurs minimales ou maximales de chaque municipalité. Plus la valeur est élevée, plus la municipalité diffère du reste du département.

\*\*Le gradient de couleur indique les semaines où les points minimaux et maximaux de la pression moyenne hebdomadaire au niveau de la mer sont atteints.

**Figure 35.** Le risque relatif (RR) de la dengue basé sur le décalage (en semaines) de la covariable de précipitations moyennes hebdomadaires pour les municipalités (a) Villavicencio, (b) Acacias, (c) San Luis de Cubarral, (d) El Castillo et (e) Mesetas.

**Figure 36.** Le risque relatif (RR) de la dengue basé sur le décalage (en semaines) de la covariable de température moyenne hebdomadaire de l'air pour les municipalités (a) Acacias, (b) Castilla La Nueva, (c) San Luis de Cubarral, (d) El Calvario et (e) Puerto Concordia.

**Figure 37.** Le risque relatif (RR) de la dengue basé sur le décalage (en semaines) de la covariable de la température du point de rosée moyenne hebdomadaire pour les municipalités (a) San Martin, (b) San Juanito, (c) Restrepo, (d) Puerto Lopez et (e) El Calvario.

**Figure 38.** Le risque relatif (RR) de la dengue basé sur le décalage (en semaines) de la covariable de la pression au niveau de la mer moyenne hebdomadaire pour les municipalités (a) Cumaral, (b) San Juanito, (c) Vista Hermosa, (d) Puerto Lopez et (e) Granada.

**Figure 39.** Graphique illustrant le risque relatif (RR) variant selon le décalage des valeurs de la covariable de précipitations hebdomadaires moyennes à un quantile de 10% (a) et de 50% (b).

**Figure 40.** Graphique illustrant le risque relatif (RR) variant selon le décalage des valeurs de la covariable de précipitations hebdomadaires moyennes à un quantile de 75% (a) et de 95% (b).

**Figure 41.** Graphique illustrant le risque relatif (RR) variant selon le décalage des valeurs de la covariable de température ambiante hebdomadaire moyenne à un quantile de 10% (a) et de 50% (b).

**Figure 42.** Graphique illustrant le risque relatif (RR) variant selon le décalage des valeurs de la covariable de température ambiante hebdomadaire moyenne à un quantile de 75% (a) et de 95% (b).

**Figure 43.** Graphique illustrant le risque relatif (RR) variant selon le décalage des valeurs de la covariable de la température du point de rosée hebdomadaire moyenne à un quantile de 10% (a) et de 50% (b).

**Figure 44.** Graphique illustrant le risque relatif (RR) variant selon le décalage des valeurs de la covariable de la température du point de rosée hebdomadaire moyenne à un quantile de 75% (a) et de 95% (b).

**Figure 45.** Graphique illustrant le risque relatif (RR) variant selon le décalage des valeurs de la covariable de la pression au niveau de la mer hebdomadaire moyenne à un quantile de 10% (a) et de 50% (b).

**Figure 46.** Graphique illustrant le risque relatif (RR) variant selon le décalage des valeurs de la covariable de la pression au niveau de la mer hebdomadaire moyenne à un quantile de 75% (a) et de 95% (b).

**Figure 47.** Carte géographique de Méta illustrant le **risque relatif (RR) maximal** avec le décalage où celui-ci est atteint pour les **précipitations hebdomadaires moyennes** à un quantile de 10% (a), 50% (b), 75% (c) et 95% (d). Un tableau de densité des décalages est présenté dans le coin inférieur droit de la figure avec un compte et pourcentage des municipalités avec lesquels le décalage s'associe.

**Figure 48.** Carte géographique de Méta illustrant le **risque relatif (RR) minimal** avec le décalage où celui-ci est atteint pour les **précipitations hebdomadaires moyennes** à un quantile de 10% (a), 50% (b), 75% (c) et 95% (d). Un tableau de densité des décalages est présenté dans le coin inférieur droit de la figure avec un compte et pourcentage des municipalités avec lesquels le décalage s'associe.



**Figure 49.** Carte géographique de Méta illustrant le **risque relatif (RR) maximal** avec le décalage où celui-ci est atteint pour les **températures ambiantes hebdomadaires** moyennes à un quantile de 10% (a), 50% (b), 75% (c) et 95% (d). Un tableau de densité des décalages est présenté dans le coin inférieur droit de la figure avec un compte et pourcentage des municipalités avec lesquels le décalage s'associe.

**Figure 50.** Carte géographique de Méta illustrant le **risque relatif (RR) minimal** avec le décalage où celui-ci est atteint pour les **températures ambiantes hebdomadaires** moyennes à un quantile de 10% (a), 50% (b), 75% (c) et 95% (d). Un tableau de densité des décalages est présenté dans le coin inférieur droit de la figure avec un compte et pourcentage des municipalités avec lesquels le décalage s'associe.

**Figure 51.** Carte géographique de Méta illustrant le **risque relatif (RR) maximal** avec le décalage où celui-ci est atteint pour la **température du point de rosée hebdomadaire moyenne** à un quantile de 10% (a), 50% (b), 75% (c) et 95% (d). Un tableau de densité des décalages est présenté dans le coin inférieur droit de la figure avec un compte et pourcentage des municipalités avec lesquels le décalage s'associe.

**Figure 52.** Carte géographique de Méta illustrant le **risque relatif (RR) minimal** avec le décalage où celui-ci est atteint pour la **température du point de rosée hebdomadaire moyenne** à un quantile de 10% (a), 50% (b), 75% (c) et 95% (d). Un tableau de densité des décalages est présenté dans le coin inférieur droit de la figure avec un compte et pourcentage des municipalités avec lesquels le décalage s'associe.

**Figure 53.** Carte géographique de Méta illustrant le **risque relatif (RR) maximal** (a) et (b) et **minimal** (c) et (d) avec le décalage où celui-ci est atteint pour la pression au niveau de la mer hebdomadaire moyenne au niveau de la mer à un quantile de 10% et de 95%.

## Liste des abréviations

AE. AEGYPTI	<i>Aedes aegypti</i>
AE. ALBOPICTUS	<i>Aedes Albopictus</i>
ARIMA	Modèle de moyenne mobile intégrée autorégressive ( <i>Autoregressive integrated moving average</i> )
DLNM	Modèle non linéaire à décalage distribué ( <i>Distributed lag non-linear models</i> )
GLM	Modèle linéaire généralisé ( <i>Generalized Linear Model</i> )
GAM	Modèle additif généralisé ( <i>Generalized Additive Model</i> )
HMM	Modèle de Markov caché ( <i>Hidden Markov Model</i> )
IC	Incidence cumulée
RR	Risque relatif
TPR	Température du point de rosée

*Mama,  
Abi,*

*Pour avoir été des modèles admirables en efforts et en sacrifices,  
Pour votre bienveillance, votre amour,  
votre appui, votre patience, votre écoute,  
votre accompagnement et vos encouragements*

## Remerciements

Je tiens d'abord à exprimer mon immense gratitude à ma directrice académique de recherche, Bouchra Nasri pour son support inconditionnel, ses conseils, et sa compassion tout au long de ce processus. Je souhaite également adresser mes remerciements les plus sincères à ma co-directrice, Kate Zinszer pour la qualité de son encadrement, sa disponibilité ainsi que son expertise. Toutes deux ont été de véritables sources d'inspiration qui m'ont permis d'aboutir à mes objectifs.

Par cette même occasion, j'aimerais témoigner de ma reconnaissance aux membres du laboratoire que j'ai eu la chance de côtoyer virtuellement en raison de la pandémie et qui ont enrichi mes réflexions en matière de recherche. Notamment, j'aimerais souligner le soutien de Mamadou Yamar Thioub qui m'a initié à l'utilisation des cartes géographiques sur R. Puis, un merci révérencieux au corps professoral de l'ESPUM pour le savoir acquis dans le cadre de ce programme de maîtrise.

Je ne pourrai achever mes remerciements sans exprimer mon appréciation à mes parents, mes frères, mes cousin(e)s et au reste de ma famille qui ont été présents pour moi de loin ou de près. Je remercie profondément mes amies qui m'ont soutenu et motivé et à qui j'ai dû refuser plusieurs sorties pour la complétion de ce mémoire. Merci à Maila et Milo, mes *fur friends*, pour le support émotionnel.

Merci aux membres du jury pour le temps accordé à la révision de ce mémoire.

*Un cordial remerciement à tous, sans votre continuel appui, je ne serais jamais parvenu à compléter ce beau projet qu'est ma maîtrise*

# Chapitre 1 : Introduction

Les arbovirus se catégorisent comme des virus transmis par des vecteurs arthropodes comprenant les moustiques, les tiques et les phlébotomes<sup>1</sup>. Parmi ces derniers, la dengue, le chikungunya et le virus Zika ne cessent d'émerger et partagent tous un vecteur commun, *Aedes*<sup>2</sup>. Selon les données de l'organisation panaméricaine de la santé (OPS), on peut observer une dominance de la dengue parmi les trois maladies mentionnées, avec l'année record en 2019, dépassant les 3 millions de cas dans les Amériques<sup>3</sup>. En 2022, la dengue enregistre des semaines avec plus de 100 000 cas, comparativement à chikungunya dépassant les 10 000 cas et le virus Zika dépassant les 1000 cas<sup>3</sup>.

Dans la dernière décennie, la dengue a atteint des dimensions énormes avec des conséquences alarmantes, spécialement dans les pays à faibles revenus ou intermédiaires<sup>4-5</sup>. Elle s'est particulièrement démarquée par ses chiffres à la hausse touchant en moyenne 390 millions de cas mondialement (intervalle de confiance de 284-528)<sup>6</sup>, ce qui a drastiquement augmenté dans les dernières années. Jusqu'en 1970, la dengue était présente dans moins de 10 pays, ce qui n'est plus le cas aujourd'hui puisqu'elle est endémique dans plus de 100 pays<sup>7</sup>. De 2007 à 2017, le taux de mortalité de cette fièvre possède l'augmentation la plus élevée soit de 65.5% [21.7%,99.7%]<sup>8</sup>. D'ailleurs, son fardeau économique mondial pour l'année 2013 a été estimé à 8.9 milliards de dollar (USD)<sup>9</sup>.

Évidemment, ceci a été facilité avec la présence des éléments clés soit le virus, les moustiques, les humains et les conditions environnementales<sup>10-12</sup>. La propagation de la maladie orbite autour des sites de reproduction du vecteur *Aedes* qui peuvent être impactés par maints facteurs. Parmi ces derniers, on compte des facteurs climatiques, sociodémographiques et socioéconomiques qui peuvent avoir des répercussions directes et indirectes sur l'incidence de la maladie tels que l'urbanisation rapide, le stockage des eaux usées, les mauvaises conditions de logement, la température, les précipitations, l'humidité, l'hygiène pauvre et bien d'autres<sup>12-17</sup>. Ainsi, la Colombie est un pays à climat tropical et endémique de la dengue qui possède les conditions propices à la transmission. Le département Méta en est un qui a vu ses chiffres croître en flèche et s'est classé parmi les départements avec les incidences les plus élevées en 2019<sup>1</sup>. Malheureusement, ses tendances internes (c.-à-d. par municipalités) spécifiques n'ont pas été

concrètement élucidées par des études antérieures, se focalisant dans la plupart des cas, sur une échelle nationale, d'où l'importance du présent mémoire.

Dans le cadre de ce projet, j'examine l'influence potentielle que les facteurs environnementaux ont sur la transmission de la dengue spatialement et temporellement, pour une région endémique en Colombie, Méta. Les objectifs de ce mémoire à devis descriptif sont centralisés autour de la tendance de l'incidence de la maladie à travers les municipalités de Meta de façon individuelle et globale et l'identification des prédicteurs. Ceci a d'abord été réalisé par l'entremise d'une analyse descriptive puis par une modélisation basée sur les modèles de Markov caché à changement de régime, les régimes étant des variables latentes. Nous avons prévu que les précipitations, la température, la pression au niveau de la mer ainsi que l'humidité présenteraient des résultats conclusifs quant à leur influence sur la dengue à Méta.

## Chapitre 2 : Recension des écrits

Originellement une maladie zoonotique, la dengue a émergé des primates et se transmet aujourd'hui par l'entremise de moustiques femelles infectés, *Aedes aegypti* (*Ae.aegypti*) ou *Aedes Albopictus* (*Ae.Albopictus*), la catégorisant donc de maladie vectorielle<sup>5,6,15</sup>. Elle se définit aussi comme une maladie virale systémique aiguë des plus communes parmi les arbovirus affectant les humains<sup>6,18</sup>. En fait, cette maladie s'est grandement propagée suivant la Seconde Guerre mondiale principalement due à la mondialisation facilitant la mobilité humaine<sup>10,15,19-22</sup>. À ce jour, on estime qu'environ 390 millions d'individus la contractent annuellement, mais approximativement 3.9 milliards de personnes vivent dans une région à risque<sup>23</sup>. Ces dernières sont essentiellement celles de climats tropicaux et subtropicaux, avec une concentration en Asie, en Amérique latine et en Afrique<sup>24</sup>. Des sources affirment leur limitation géographique entre la 35<sup>e</sup> parallèle nord et la 35<sup>e</sup> parallèle sud du globe<sup>25</sup>. Sa propagation continue dans de nouvelles régions géographiques du monde où les environnements sont favorables à la reproduction des vecteurs et où le virus est présent<sup>26</sup>. La dengue présente un risque d'infection pour tous les âges. Néanmoins, les données de surveillance ont prouvé que les jeunes enfants étaient davantage affectés<sup>26-30</sup>. Bien que mourir de cette maladie vectorielle peut être prévenu, on rapporte que son taux de létalité dépasse 1% à l'international<sup>31</sup>.

Le virus de la dengue est un arbovirus, un terme dérivé de *arthropod-borne viruses*<sup>6,12,32</sup>. Il consiste en un flavovirus à ARN de brin à polarité positive, DENV, et existe sous 4 sérotypes antigéniquement distincts étant DENV-1, DENV-2, DENV-3 et DENV-4<sup>13,32</sup>. Une fois infecté et récupéré d'un sérotype spécifique, un sujet est immunisé contre ce dernier à vie<sup>33</sup>. Cependant, la contraction d'une seconde infection d'un sérotype hétérogène constitue un facteur de risque pour que le cas de maladie aboutisse en dengue hémorragique ou en syndrome de choc de la dengue<sup>33-36</sup>. Ceci est notamment dû à la réactivité croisée, l'interaction du virus de la dengue avec les anticorps de l'infection précédente. Bien que les sérotypes puissent tous deux circuler dans les mêmes régions simultanément, il existe généralement un sérotype dominant. Cette situation facilite d'ailleurs les infections secondaires de dengue, un facteur de risque de la dengue hémorragique<sup>5</sup>.

## 2.1 Signes et symptômes

Selon l'OMS, trois stades de dengue sont reconnus selon la sévérité clinique : (1) la dengue (2) la dengue hémorragique ou sévère et (3) le syndrome de choc de la dengue <sup>37</sup>. D'abord, le premier stade de la dengue possède un large spectre de symptômes qui varient cliniquement d'asymptomatiques à sévèrement symptomatiques. Il est estimé qu'environ 1 cas de dengue sur 4 est symptomatique <sup>38</sup>. Les symptômes durent entre 2 à 7 jours après la période d'incubation de 4 à 10 et sont les suivants : fièvre de plus de 38°C, maux de tête sévères, douleurs rétro-orbitaires, nausées et vomissements, fatigue et douleurs articulaires et musculaires <sup>17,39-42</sup>. Quant aux cas cliniques, leur définition repose sur la présence de fièvre pendant 2 à 7 jours en combinaison avec deux autres symptômes cités ci-haut. À noter que suivant la période d'incubation, on subdivise les manifestations en 3 phases : une phase fébrile, une phase critique et une phase de récupération spontanée <sup>39</sup>. La phase fébrile correspond à la dengue initiale symptomatique sans complications majeures <sup>39</sup>.

Chez 1 cas de maladie sur 20, la dengue peut s'aggraver en une dengue hémorragique, également connue sous le nom de fièvre sévère <sup>35,43</sup>. Les symptômes associés à celle-ci sont les suivants : douleurs abdominales, saignements du nez ou des gencives, vomissements de sang ou de saignements dans les selles, ecchymoses ou difficultés respiratoires (dyspnée) <sup>38,40,44-46</sup>. La phase critique est atteinte 3 à 7 jours après le début de la maladie<sup>40</sup>. La distinction entre la dengue et la dengue hémorragique réside dans la perméabilité vasculaire accrue qui peut elle-même mener au syndrome de choc de la dengue <sup>48</sup>. À travers les études disponibles dans la littérature, le taux de mortalité de la dengue hémorragique a été fixé entre 1-4% <sup>44,50,51</sup>. On attribue la complication principale liée au décès comme étant les saignements gastro-intestinaux <sup>32,50</sup>. En ce qui concerne le syndrome de choc de la dengue, il consiste de la complication la plus fatale de cette maladie virale survenant chez 20-30% des sujets atteignant la dengue sévère <sup>36,54</sup>. Parmi ses symptômes, on compte une perméabilité (ou résistance) vasculaire élevée, une pression sanguine diastolique élevée, un dysfonctionnement du myocarde et une déshydratation mène à ce stade<sup>35</sup>. Le syndrome de choc est une complication arrivant principalement au sein des enfants de moins de 12 ans dues au système hémodynamique n'étant pas assez robuste pour les fuites capillaires <sup>29,30</sup>. D'ailleurs, les débuts de la dengue hémorragique et du syndrome de choc ne peuvent d'ailleurs pas être discernés de la fièvre de la dengue basique. La manifestation de ceux-ci débute après la résolution de la fièvre<sup>36</sup>. Le taux de mortalité de ce stade de la maladie est 50 fois celui des cas de dengue <sup>45</sup>.



## 2.2 Diagnostic et traitement

Le diagnostic joue un rôle important dans les soins cliniques des individus touchés, dans la surveillance ainsi que dans la recherche. La détection précoce permet de prévenir la morbidité ainsi que la mort<sup>21,56</sup>. Suivant le diagnostic clinique, plusieurs méthodes peuvent être utilisées afin de confirmer la présence de la dengue chez le sujet. Selon le moment de la présentation, plusieurs méthodes sont connues. D'abord, on retrouve les tests virologiques et sérologiques<sup>40</sup>. Pour les tests virologiques, ils donnent la possibilité d'isoler le virus à partir d'un échantillon de sang au début de l'infection en utilisant des méthodes de transcription inverse suivie d'une amplification en chaîne par polymérase (RT-PCR) ou des tests de protéines produites par le virus (NS1)<sup>39,57</sup>. Cependant, ils ne représentent pas une option viable pour les pays en contexte endémique, étant très dispendieux<sup>37</sup>. La sensibilité et la spécificité des tests NS1 sont de 77.3% et 100% à 15 minutes et de 80.5% et 100% à 30 minutes<sup>58</sup>. En ce qui a trait des tests RT-PCR, leur sensibilité et leur spécificité ont grandement été améliorées se situant entre 80 et 100% ainsi que 99 et 100%, respectivement<sup>59</sup>. Les tests sérologiques peuvent confirmer la présence d'une maladie récente ou passée par des méthodes de dosage immuno-enzymatique (ELISA)<sup>36,39</sup>. Contrairement à la méthode virologique, la méthode sérologique ne nécessite pas d'équipement spécial et une formation du personnel, la rendant disponible sur une plus grande étendue d'installations médicales<sup>37</sup>. Ils constituent d'abord une des options les plus abordables du marché<sup>37</sup>. On rapporte que la sensibilité de ce test dépasse 90% pour la première infection et est entre 60 % et 80% pour la seconde<sup>58,60</sup>. À titre informatif, il existe également des tests ELISA rapides commerciaux<sup>60</sup>. Le principal indicateur d'une infection récente est l'anticorps anti-dengue, IgM, détectable dans 50 % des cas 3 à 5 jours après le début de la maladie et demeure repérable dans le sang pour environ 3 à 4 semaines<sup>60</sup>. Un autre anticorps impliqué dans le test sérologique de la dengue est l'IgG qui, contrairement aux IgM, reste dans le métabolisme pendant des années après la maladie<sup>36,39</sup>. La présence de cet anticorps ne fournit pas d'informations temporelles précises, car il est détectable à vie après une infection<sup>43</sup>. D'un autre côté, l'IgM est préférable pour s'informer sur une nouvelle incidence de la maladie, mais est limitatif pour sa courte fenêtre de détection.

Bien qu'aucun traitement antiviral spécifique n'existe sur le marché, les symptômes de la dengue peuvent être contrôlés à l'aide d'analgésiques tels que l'acétaminophène ou le paracétamol<sup>29</sup>. Cependant, les anti-inflammatoires non stéroïdiens (AINS), dont l'aspirine, doivent être évités en raison de leurs particularités anticoagulantes<sup>29</sup>. Il est également recommandé de s'hydrater et

d'incorporer, si possible, des électrolytes<sup>39</sup>. La transfusion sanguine peut être d'usage dans les cas extrêmes d'hémorragie<sup>39</sup>.

### **2.3 *Aedes*, le vecteur à la source**

Au noyau de la transmission de la dengue est *Aedes aegypti*, le vecteur principal, et *Aedes albopictus*, le vecteur secondaire<sup>36,61-62</sup>. Moustiques urbains tropicaux invasifs, ils sont également à la source de la fièvre de chikungunya, la fièvre jaune et le virus Zika par alimentation sanguine<sup>63-65</sup>. La dispersion des moustiques géographiquement contribue grandement à la transmission de la maladie.

La première étape à la propagation du virus de la dengue comprend l'alimentation du sang infecté de l'hôte, l'humain, par le vecteur, le moustique femelle, nécessitant les protéines présentes dans le sang pour la conception de ses œufs<sup>66</sup>. Bien que la maladie touche également des primates non humains, l'humain infecté demeure le réservoir le plus important pour ce virus<sup>29,32</sup>. Pour être infecté, il se doit du moustique de piquer le sujet dans les trois premiers jours de son infection<sup>62,67</sup>. D'ailleurs, le cours d'un repas d'un moustique peut inclure la pique de plusieurs individus distincts. Par la suite, ceci engendre naturellement une infection chez le vecteur, se propageant d'abord à travers la barrière épithéliale puis atteint son hématocele, ses glandes salivaires, son système nerveux et ses ovaires<sup>67,68</sup>. À ce stade-ci, le moustique devient un réservoir à vie et peut transmettre à son tour le virus par injection intradermique des particules infectieuses<sup>67,68</sup>. À noter qu'il faut 8 à 11 jours suivant l'infection du vecteur afin qu'il puisse amorcer la transmission de la maladie à d'autres individus<sup>62</sup>. Suivant la pique du moustique infecté, le virus de la dengue atteint les macrophages et les cellules dendritiques du sujet et poursuit par une répllication dans les ganglions lymphatiques régionaux<sup>29</sup>. La maladie devient en conséquence systémique, considérant que le virus se propage dans les vaisseaux sanguins et lymphatiques du corps. Cette période, aussi connue sous le nom de période d'incubation, dure de 4-10 jours comme mentionné ci-dessus<sup>29</sup>. Puis, le cycle de vie des moustiques *Aedes* est constitué de 4 stades : œuf, larve, nymphe et adulte<sup>62</sup>. Les œufs transitionnent vers des larves à moins de 48 heures après avoir été submergés d'eau<sup>70</sup>. L'évolution entre le stade de larve et de nymphe prend environ 5 jours, tandis que celle de nymphe à adulte prend 2 à 3 jours<sup>71</sup>. Vu que certains moustiques nécessitent des jours pour éclore, d'autres des semaines, ils le font par lots<sup>62</sup>. Afin de nourrir leurs œufs, ils s'alimentent préférentiellement du sang humain et ceci est fait pour la première fois environ deux jours suivant leurs transitions vers le statut d'adulte<sup>62</sup>.

L'aube et le crépuscule sont les périodes où les piqûres sont accrues, mais celles-ci peuvent se faire toute la journée <sup>61</sup>. Cela dit, ces moustiques peuvent voler à une distance maximale entre 154 mètres et 1207 mètres et peuvent vivre à l'extérieur comme à l'intérieur des domiciles <sup>32,72-74</sup>. Toutefois, *Ae.aegypti* démontre une préférence de piqûres dans les milieux intérieurs, inversement à *Ae.albopictus* qui préfère les milieux extérieurs<sup>75</sup>. La capacité vectorielle se distingue entre les deux espèces étant donné qu'*Ae.aegypti* peut se nourrir de différents hôtes durant un cycle de production d'œufs contrairement à *Ae.albopictus* qui généralement se nourrit d'un seul individu <sup>69,76,77</sup>. À des températures chaudes, les deux espèces pondent entre 50 et 120 œufs aux 2-3 jours, tous protégés par une coquille <sup>70</sup>. Elles pondent un maximum de trois groupes avant de mourir et ceux-ci sont tous issus d'un unique accouplement <sup>70</sup>. La littérature actuelle démontre l'existence d'une transmission verticale de la dengue des moustiques femelles vers leurs œufs aidant la persistance du statut endémique du virus <sup>32,78-82</sup>.

Le milieu idéal pour la reproduction et la ponte correspond aux petits contenants artificiels où les moustiques femelles retrouvent une surface humide pour y pondre leurs œufs <sup>32,62,83-84</sup>. Parmi ceux-ci, on compte les pneus, des seaux, des pots, des vases, des gouttières d'eau, des conteneurs ou pots d'argile avec de l'eau stagnante <sup>32,62,84-86</sup>. La transpiration humaine se voit elle aussi créer un environnement favorable à l'attraction des moustiques *Aedes*, très sensibles à cette odeur <sup>87</sup>. On rapporte que la durée de vie d'*Ae.aegypti* dans les régions tropicales est de quelques jours à semaines et environ 1 an dans les régions tempérées <sup>70</sup>.

## **2.4 Facteurs extrinsèques à la transmission**

Étant donné que la transmission de la dengue dépend entièrement de la sensibilité des vecteurs à l'environnement les entourant, il est primordial de comprendre l'impact des différents facteurs sur la survie et la reproduction <sup>10</sup>. Ceux-ci seraient notamment cruciaux pour définir des priorités d'adaptation et de mitigation propre à chaque région. Dans le cadre de cette revue, nous compartimentons ces facteurs en deux catégories : (1) les facteurs climatiques et environnementaux et (2) les facteurs sociodémographiques et socioéconomiques.

### **2.4.1 Facteurs environnementaux et climatiques**

Plusieurs facteurs abiotiques possèdent un impact sur l'expansion géographique de cette maladie virale ainsi que sur l'occurrence de futures pandémies pour la cause principale de la

sensibilité climatique du moustique *Aedes*<sup>89,90</sup>. Les conditions environnementales faisant fluctuer la capacité vectorielle, l'abondance des moustiques et conséquemment l'incidence de la dengue. La littérature actuelle démontre une consistance en matière du rôle majeur qu'ont la température, l'humidité relative, les précipitations et l'élévation sur la variation des cas de la maladie. La relation entre l'environnement et les variables liées à la dengue ne sont pas linéaires. On retrouve plutôt des seuils optimaux, sous-optimaux et aucunement favorables à la transmission de la dengue.

Le premier facteur agissant sur la dynamique de la population des moustiques, de leur habitude d'alimentation et développement viral est la température<sup>14,16,17,28,61,64,76,90-92</sup>. Il est connu que des températures élevées favorisent la propagation de la dengue due au nombre de piqures élevées. Les marges de températures convenables à la transmission de la dengue varient d'une région à l'autre et même au sein d'un même pays<sup>93</sup>. De façon globale, la température la plus avantageuse pour le cycle de vie, la dynamique des populations, la croissance, la fréquence d'alimentation en sang et le taux de reproduction des moustiques est au-dessus de 21°C<sup>16,18,73,89-91,94-97</sup>. L'Annexe A présente des marges définies par certaines études dans la littérature. Au-dessous de 15 °C et supérieure à 35 °C ne sont pas optimales pour leur reproduction<sup>18,28,89</sup>. Il a été prouvé qu'une température basse, soit en dessous de 15°C, limite l'éclosion des œufs des espèces en question et leur développement larvaire<sup>18,61</sup>. Cependant, une température élevée de plus de 35°C diminue le temps d'incubation et augmente les chances de développement viral des moustiques, allant même à pouvoir tuer des moustiques adultes<sup>12,18</sup>. Une température de plus de 16°C s'est révélée favoriser l'achèvement du cycle de vie des moustiques reliés à la dengue<sup>98</sup>. Les cas de dengue fluctuent également avec la température maximale<sup>16,98</sup>. La variabilité quotidienne de la température est un important déterminant pour l'incidence de la dengue et ses tendances<sup>99</sup>. Ils ont conclu que des variations importantes de températures diurnes diminue la survie d'*Ae. aegypti*<sup>89,99,100</sup>. En fait, ces vecteurs se sont avérés plus touchés par une fluctuation de la température modérée, ce qui les a amenés à survivre plus longtemps et à s'infecter<sup>99</sup>. Comme mentionné plus haut, *Ae. albopictus* a une plus grande tolérance au changement de la température<sup>29</sup>. Une relation a aussi été démontrée entre les cas de dengue annuels et l'augmentation de la moyenne mensuelle de la température minimale pendant la mousson. Cela mène à penser qu'une variable explicative essentielle du risque de la dengue est la température particulièrement

durant la période de transmission <sup>101</sup>. L'augmentation de la température et des précipitations est associée à des augmentations des cas de dengue <sup>73,102</sup>.

L'humidité relative fait aussi en sorte de créer un environnement propice pour la survie des moustiques <sup>17,64,65,76,90,104–108</sup>. Elle se définit comme la quantité d'eau en état gazeux présente dans un volume d'air avec la valeur de 100% étant le stade où l'air est à son pic de saturation<sup>1</sup>. La mortalité de *Ae. albopictus* est promue lorsque la température est au-dessus de 22°C et l'humidité relative est inférieure à 95% <sup>109</sup>. Une température basse en concordance avec une humidité relative élevée a plutôt tendance à être un environnement idéal pour la survie des moustiques adultes, qui aboutit en une augmentation de la période sur laquelle les moustiques peuvent se nourrir d'un sang humain infecté <sup>61,65</sup>. À noter qu'une humidité relative élevée est considérée supérieure à 80% <sup>110</sup>. Une autre étude place un environnement favorable à une humidité relative de 50–55%<sup>111</sup>. Contradictoires à cela, d'autres travaux ont indiqué qu'une humidité relative basse, c'est-à-dire moins de 60%, en concordance avec de hautes températures influence la fécondité des moustiques, la propagation virale et la survie des vecteurs <sup>101,112</sup>. Le point de rosée est une mesure reconnue comme la plus pointue en termes d'humidité<sup>187</sup>. Elle constitue de la température nécessaire pour refroidir l'air pression barométrique constante afin d'atteindre une humidité relative de 100% (saturation), le point où l'air ne peut supporter davantage d'eau en état gazeux <sup>187–189</sup>. Poursuivre le refroidissement engendrerait le changement d'état de la vapeur d'eau à une forme liquide, soit en précipitations ou brouillard. Une température à point de rosée (TPR) supérieurement élevée indique une haute humidité <sup>187</sup>. Au contraire, une TPR basse traduit un air très sec ne contenant presque aucune molécule d'eau<sup>190</sup>. L'humidité relative peut être trompeuse quant au confort extérieur, tandis que le point de rosée recommande la véritable impression<sup>187</sup>.

Les précipitations influencent aussi la fluctuation de l'incidence de la dengue créant davantage de sites de reproduction, de développement et de ponte des œufs<sup>7,16,28,65,91,92,104–106,113,114</sup>. Toutefois, des quantités excessives de précipitations peuvent être désavantageuses dans le sens où elles laveront les œufs ou les détruiront <sup>61,102,111</sup>. Les précipitations quotidiennes extrêmes sont des facteurs qui affectent considérablement la survenue et la transmission de la dengue<sup>113,116</sup>. Prenant en compte que la phénologie possède un rôle crucial vis-à-vis de la dengue, la saison de mousson se voit accroître l'occurrence de la maladie<sup>28,90,98,102,103,113,117</sup>. Nous voyons une différence de grande envergure entre les cas moyens de dengue pendant la période sèche et la période pluvieuse, mettant en valeur la saisonnalité existante<sup>102</sup>. Vers la fin d'une saison sèche, on

rapporte qu'un déficit de pluie substantiel engendre un risque accru d'épidémie l'année suivante<sup>118</sup>.

L'élévation influence largement le risque de la propagation de la dengue<sup>17,81,101,119,120</sup>. On fixe le seuil favorable à moins de 6500 pieds (1981,2 mètres)<sup>74</sup>. Au-dessus de cette valeur, il existe des chances moins importantes d'attraper la dengue, toutefois, la possibilité d'épidémies à ce niveau n'est pas écartée<sup>74,119</sup>. En effet, une relation négative entre cette covariable et l'incidence de la dengue a été documentée<sup>17,101,121</sup>. L'importance de l'élévation pour la transmission de la dengue s'explique également par la pression atmosphérique, dans la mesure où lorsque celle-ci décroît l'élévation hausse<sup>18,105</sup>. L'augmentation de la pression atmosphérique est étroitement liée à l'augmentation de la densité populationnelle des moustiques. Ceci est remarqué notamment par l'abondance des larves au fur et à mesure que la pression atmosphérique diminue<sup>18</sup>. De plus, cette variable affecte les sites de reproduction<sup>18</sup>. On attribue cela parallèlement à la préférence des moustiques du vol à des altitudes de basses pressions atmosphériques, des environnements davantage fréquentés par les humains<sup>18</sup>.

L'augmentation des températures, des précipitations et de l'humidité à un certain niveau tend à créer des environnements de plus en plus adéquats pour les vecteurs *Aedes*<sup>56</sup>. Une enquête en 2015 a estimé grâce à de la modélisation qu'approximativement 53% (3.83 milliards d'individus [3.45–4.09]) de la population mondiale vivait dans des zones favorables à la transmission de la dengue<sup>122</sup>. Une étude prédictive a également été établie que 50 à 60% de la population mondiale serait à risque de la dengue d'ici l'année 2085<sup>10</sup>. Avec l'augmentation de la température globale, il a été prédit que *Ae. aegypti* pourra survivre à des altitudes plus élevées d'ici l'année 2100<sup>123</sup>.

#### **2.4.2 Facteurs socioéconomiques et sociodémographiques**

En ce qui concerne les facteurs socioéconomiques et sociodémographiques, les études scientifiques ont établi que l'expansion de la dengue est multifactorielle. L'hétérogénéité de ceux-ci est existante d'une région à l'autre et à travers le temps également tout comme les facteurs climatiques. Parmi les nombreuses raisons derrière la fluctuation de l'incidence de la maladie, on compte les environnements urbains, les caractéristiques des logements et de la ville, la connectivité mondiale et les conditions sociales.

Les environnements urbains représentent l'environnement idéal à la transmission de la dengue. La raison principale réside derrière la haute densité populationnelle favorisant la proximité

des individus et permettant la provenance d'une alimentation sanguine des moustiques femelles de personnes distinctes<sup>5,6,22,61,69</sup>. En lien avec la densité populationnelle, le nombre d'individus par ménage joue également un rôle dans la facilité de transmission<sup>73</sup>. La planification urbaine insinue aussi la localisation des espaces verts, des environnements bâtis, de l'hygiène incluant les égouts (les systèmes de drainage) et les déchets possèdent le pouvoir de changer l'incidence de la dengue<sup>11,120,124</sup>. Une association négative a été prouvée entre l'indice de végétation par différence normalisée, le plus bas indiquant une plus haute densité populationnelle, et la dengue<sup>98,124</sup>. Ceci s'explique par la préférence des vecteurs des environnements urbains plutôt que ruraux<sup>125</sup>. En effet, ces régions sont plus propices étant donné les courtes distances entre les établissements et la densité des logements supérieure<sup>126</sup>. Les espaces verts sont connus comme défavorisant les sites de reproduction d'*Aedes*<sup>124</sup>.

Les caractéristiques propres aux logements et de la ville possèdent un rôle crucial dans la propagation de la dengue. Le fonctionnement de l'approvisionnement de l'eau potable influence directement la présence des sites de reproduction. Sans un accès régulier à l'eau, les résidents vont procéder au stockage de l'eau dans des contenants, des environnements propices à la reproduction d'*Ae. aegypti*<sup>127,128</sup>. Le nettoyage à une fréquence hebdomadaire et la couverture de ces contenants sont des pratiques recommandées par l'OMS et ayant été prouvé de réduire la reproduction du vecteur<sup>40</sup>. La présence de pneus usés, des seaux, des pots, des vases, des gouttières d'eau, des réservoirs d'eaux usées, des conteneurs ou des pots d'argile avec de l'eau stagnante met les habitants davantage à risque de piqûres créant un milieu favorable à la reproduction des vecteurs<sup>11,32,62,84-86</sup>. De plus, les déchets municipaux ainsi que le traitement des eaux usées influencent la présence des sites de reproduction<sup>127,128</sup>. En ce qui concerne les déchets, l'irrégularité ou l'absence des services municipaux de collection augmente l'occurrence de la maladie<sup>85,127,129</sup>. D'ailleurs, les mauvaises pratiques d'élimination des déchets solides, le manque de service de collecte des déchets et des eaux usées et l'accumulation d'eau de précipitations accroissent tous la probabilité d'infection par la dengue<sup>4</sup>. Puis, les logements à proximité des transports en commun constituent un facteur de risque pour l'émergence de la maladie dans de nouvelles régions géographiques<sup>130</sup>. Certaines conditions des logements exposent inévitablement les résidents à la maladie, dont l'absence d'air climatisé et des moustiquaires dans la maison<sup>56,81,126,131,132</sup>.

Un autre facteur pouvant jouer un rôle dans la transmission de cette maladie infectieuse est la connectivité mondiale ou mondialisation soit par la mobilité humaine, les échanges de bien

intercontinentaux ou les voyages, grâce au transport (aérien, ferroviaire ou par camion) amélioré à l'échelle internationale<sup>5,10,11,14,15,20-22,32,56,64,65,69,85,92,125,133</sup>. En effet, le déplacement d'une personne infectée/exposée peut être à l'origine d'une épidémie dans son lieu de destination avec la présence des moustiques *Aedes*<sup>134</sup>. D'ailleurs, on rapporte également que *Aedes* trouve davantage de facilité à s'établir dans de nouvelles régions géographiques, car ils sont en mesure de s'introduire dans différents modes de transportation aisément (transport aérien, ferroviaire et par camion)<sup>133</sup>.

Les conditions sociales se sont prouvées avoir un impact sur plusieurs dimensions affectant l'occurrence de la dengue<sup>135</sup>. Le faible statut socio-économique, entraînant notamment la médiocrité des infrastructures des ménages et des obstacles à l'accès aux soins de santé, influence également la survenue de la dengue<sup>4</sup>. Les conditions de logements médiocres impliquent l'absence de moustiquaires dans les fenêtres, l'utilisation de mauvais matériaux de construction et le nombre élevé d'individus par ménage<sup>1</sup>. De plus, les services municipaux disponibles peuvent également être affectés par le statut socio-économique, soit les mauvaises pratiques d'élimination et de collecte des déchets solides et des eaux usées, le manque d'eau potable et l'accumulation d'eau de précipitations qui accroissent tous la probabilité d'infection par la dengue<sup>1</sup>. Un faible niveau de scolarité est relié à davantage de cas de dengue reliés au contexte socio-environnemental, mais aussi en lien avec les connaissances, les attitudes et les pratiques (Knowledge, Attitudes, Practices - KAP)<sup>128,129</sup>. Plusieurs études évaluent l'association entre ces trois éléments de région spécifiques et rapportent qu'une faible association a été retrouvée entre les connaissances et les pratiques préventives<sup>136-142</sup>. Cette méthode quantitative s'est vue impacter non seulement la prise d'action des individus dans la prévention de la maladie, mais aussi l'adaptation des mesures d'intervention au niveau de l'éducation et des comportements de la population<sup>143,144</sup>.

## 2.5 Prévention

La prévention contre la dengue peut être entreprise à plusieurs niveaux. Dans la mesure où la vaccination n'est pas d'utilisation, les recommandations récurrentes de la santé publique dans les régions à risque orbitent toutes autour de la prévention au niveau individuelle.

Un vaccin vivant tétravalent contre la dengue, Dengvaxia, existe depuis 2015 et requiert 3 doses séparées de 6 mois chacune. Il exige des conditions épidémiologiques spécifiques comme s'identifier comme un individu âgé de 9 à 45 ans vivant en zone endémique et ayant fait l'objet



d'au moins une infection de dengue dans le passé<sup>40,145</sup>. En fait, en 2017, un programme de vaccination pour les enfants à Singapour a entraîné une augmentation de la virulence de la dengue allant jusqu'à la mort chez certains enfants séronégatifs<sup>64,65,146</sup>. Il a été prouvé que l'efficacité de Dengvaxia diffère selon les sérotypes, étant plus efficace avec DENV-3 et DENV-4. Les statistiques résultant des essais contrôlés de vaccins en Amérique latine suggèrent que le vaccin est efficace à 64,7% (IC 95% [58,7, 69,8]) contre les cas détectés virologiquement et que son efficacité est beaucoup plus élevée chez les individus séropositifs par rapport aux individus séronégatifs, avec 81,9% (IC 95% [67,2 ; 90,0]) et 52,5% (IC 95% [5,9 ; 76,1]), respectivement. Aujourd'hui, ce vaccin a été approuvé dans 19 nations et continue à s'étendre à l'échelle internationale à la discrétion des pays<sup>147</sup>. Cependant, il n'a pas encore été introduit en Colombie malgré son statut endémique principalement, car différents sérotypes circulent au sein du pays<sup>148</sup>. Ceci est notamment relié au phénomène de renforcement dépendant des anticorps de la dengue.

La prévention au niveau individuelle inclut des pratiques au niveau domestique, d'autres au niveau personnel. D'abord, il est recommandé de recouvrir les réservoirs d'eau des domiciles afin d'obstruer l'accès aux moustiques d'y créer des sites de reproduction<sup>128,137</sup>. Pour la même raison, il est découragé d'exposer des objets tels que des pneus abandonnés, de gros pots de fleurs inutilisés ou des ordures à découvert ou de les retourner afin d'éviter l'accumulation de l'eau. Empêcher les moustiques d'entrer dans les bâtisses incluant les maisons, les écoles ou les milieux de travail, constituent la meilleure façon d'être à l'abri de la dengue. Pour cela, le recours aux moustiquaires, aux raquettes antimoustiques, aux encens ainsi qu'aux serpentins afin de limiter leur circulation constitue une méthode efficace également<sup>150</sup>. D'ailleurs, l'air climatisé diminuant la chaleur et l'humidité dans les endroits intérieurs crée un environnement défavorable pour les vecteurs en question<sup>56,123,126,131,132</sup>. Le port de manches longues, chose qui n'est pas pratique en climat tropical, et l'application de crèmes/liquides antimoustiques sont grandement recommandés, et ce, surtout en heure d'aube et de crépuscule<sup>150</sup>.

## **2.6 Surveillance de la maladie**

La surveillance en santé publique est définie comme étant « la collecte, l'analyse et l'interprétation continues et systématiques de données liées à la santé essentielles à la planification, à la mise en œuvre et à l'évaluation des pratiques de santé publique »<sup>150</sup>. Ainsi, pour la fièvre de la dengue, la surveillance se fait sur trois plans qui se complètent soit épidémiologique, environnemental et entomologique<sup>56,64</sup>. Afin de procéder à des détections et un contrôle précoce

des cas, les établissements de santé publique ont recours à des moyens de diagnostics cliniques et laboratoires<sup>26</sup>. De plus, la dengue constitue d'une maladie à déclaration obligatoire et donc, tous les cas diagnostiqués devraient être capturés par le système de surveillance permettant un suivi des statistiques et une évaluation du risque. Cette composante de la surveillance est également fondamentale à l'évaluation de l'efficacité des programmes de contrôle en réponse à leur instauration. Sachant que la maladie est directement affectée par les conditions environnementales, les autorités se doivent de demeurer vigilantes à l'atteinte de seuils convenables de précipitations, de températures, d'humidité ou autres facteurs environnementaux. Pour la surveillance entomologique, des indices différents sont utilisés afin de mesurer le niveau d'infestation larvaire et des moustiques. Être bien renseigné sur l'abondance des moustiques dans la zone géographique d'habitation est un premier pas important vers la prévention de la dengue, l'implantation des mesures de précautions, l'atténuation des risques et l'allocation des ressources <sup>156</sup>. Ceci peut être réalisé par le recours à des logiciels tels que des cartes de systèmes d'information géographiques (GIS) pour situer les sites de reproduction d'*Aedes* <sup>155,156,169</sup>. Une responsabilité importante de la surveillance est la prédiction ou la notification anticipée d'une épidémie et de la densité vectorielle <sup>154,170</sup>.

La planification et l'implémentation de programmes par la santé publique se font conséquemment à la surveillance des données. Les actions proposées se distribuent entre celles en continu, en contexte épidémique et suivant les épidémies. La Fédération internationale des Sociétés de la Croix-Rouge et du Croissant-Rouge (IFRC) ont d'ailleurs mis en œuvre un plan d'action pour les régions les plus affectées de la Colombie dont Méta. Celui-ci inclut des rencontres de la communauté et des écoles pour une introduction des principes basiques, la distribution d'équipement, la création de brigades pour combattre la maladie, la formation de la communauté en matière de surveillance, des institutions de la santé et des bénévoles participant au contrôle vectoriel dans la société <sup>185</sup>. Parmi l'intégralité des mesures, l'éducation communautaire notamment sur le cycle de transmission et des méthodes de prévention est un pilier important de la lutte antivectorielle <sup>154</sup>. Instruire la population sur les dangers des vecteurs, les maladies associées, les conséquences sont des objectifs voulant être atteints par ce type d'approche communautaire pour l'ensemble des niveaux de scolarité <sup>36</sup>. D'un autre côté, cette mesure permet l'amélioration des connaissances individuelles sur le cycle de vie et la transmission des moustiques de sorte que les citoyens puissent contribuer à identifier et éliminer les sites de reproduction des

vecteurs. Le but ultime de cette méthode est de fournir aux citoyens les connaissances nécessaires pour faire face aux vecteurs et d'utiliser des moyens préventifs<sup>155</sup>. Il a été prouvé que des stratégies communautaires antérieures ont été un succès grâce à l'éducation de la population, menant notamment à des incidences de dengue inférieures<sup>168</sup>. Ceci pourrait se faire par l'entremise de l'organisation de campagnes de sensibilisation et de communication, de brochures, d'annonces à la télévision et des visites à domicile<sup>36,149</sup>. L'éducation de jeunes de niveau primaire et secondaire est un moyen pouvant faire circuler l'information davantage et les conscientiser sur leur risque accru de contracter la maladie<sup>144</sup>.

La lutte des vecteurs à la source est une partie intégrante des interventions visant le contrôle de la propagation de la dengue. L'altération des moustiques pour réduire leur population ou réduire la transmissibilité du virus de la dengue est réalisable par plusieurs moyens. Par exemple, *Wolbachia*, une bactérie endosymbiotique à Gram négatif infectant principalement les arthropodes, a été utilisé pour contrôler la transmission du pathogène de la dengue. Ceci s'effectue au sein de leur métabolisme par inhibition de la réplication de façon *in vivo* et *in vitro* chez les moustiques et est transmis par un système de forçage génétique<sup>63,83</sup>. Une différence de 37.5% a été remarquée pour la transmission virale de la dengue entre les moustiques *Ae. aegypti* infectés de *Wolbachia* et ceux de type sauvage en 14 jours<sup>162,164</sup>. Cette stratégie vise notamment la réduction de la longévité de l'espèce en question plutôt que son abondance<sup>163</sup>. La technique de l'insecte stérile (TIS) représente une approche écologique présentement étant testée visant le contrôle de la progéniture moustique par stérilisation dans plusieurs pays<sup>39,165,166</sup>. En effet, ce contrôle est envisageable par l'élevage en masse de mâles stériles qui, malgré leur accouplement avec les femelles, n'aboutiront pas en des naissances<sup>166</sup>. La modification génétique en laboratoire, une méthode où des moustiques mâles portent un gène transmis à la progéniture<sup>167</sup>. Ce gène tue les larves femelles bien avant leur atteinte au stade adulte et est transmis de façon transgénérationnelle<sup>167</sup>. À travers le temps, un nombre inférieur de femelles circulera et contribuera donc au contrôle de la population des moustiques<sup>167</sup>. Parmi les moyens de contrôle chimique, on compte les larvicides ainsi que les adulticides, fortement utilisés en contexte épidémique<sup>151-153</sup>. Les adulticides, des insecticides spécialisés, aident la destruction ou l'évitement des milieux favorables à la reproduction des moustiques adultes transmettant des virus<sup>36,84,92,154-157</sup>. L'inconvénient de cette approche synthétique repose sur leur efficacité limitée qui peut résulter en une résistance<sup>84,156,158,159</sup>. Puis, les larvicides, comme indiqué par le nom, visent

les réductions de la densité larvaire <sup>160</sup>. Ils peuvent être utilisés par la municipalité ou par les citoyens, contrairement aux adulticides, généralement employés par la municipalité en milieu extérieur selon la région. Leur usage est restreint vu la possibilité d'intoxication humaine, des conséquences environnementales et parfois la mortalité de vivants non visés <sup>161</sup>.

## **2.7 La Colombie et la dengue**

La Colombie, pays du Sud-Américain, est située au Nord-Ouest du continent à une latitude de 4.5709°N et 74.2973°W. Les régions des Caraïbes, du Pacifique, de l'Orénoque, de l'Amazone, des Andes et des îles sont les 6 régions géographiques du pays, chacune avec des caractéristiques environnementales, topographiques et climatiques distinctes <sup>171</sup>. Le pays est également subdivisé en 32 états administratifs nommés département <sup>27</sup>. Ces départements sont eux-mêmes fragmentés en provinces et municipalités. En 2018, la proportion du pays considérée comme des zones urbaines est de 80.8% <sup>172</sup>. En ce qui concerne le climat, la température varie annuellement de 18.9°C à 36.1°C dépendamment de la période de l'année et la localisation dans le pays, avec des variations considérables dans les montagnes et près de la plage. Colombie possède une seule saison annuelle qui varie uniquement en fonction de précipitations, de sécheresse et de nébulosité.

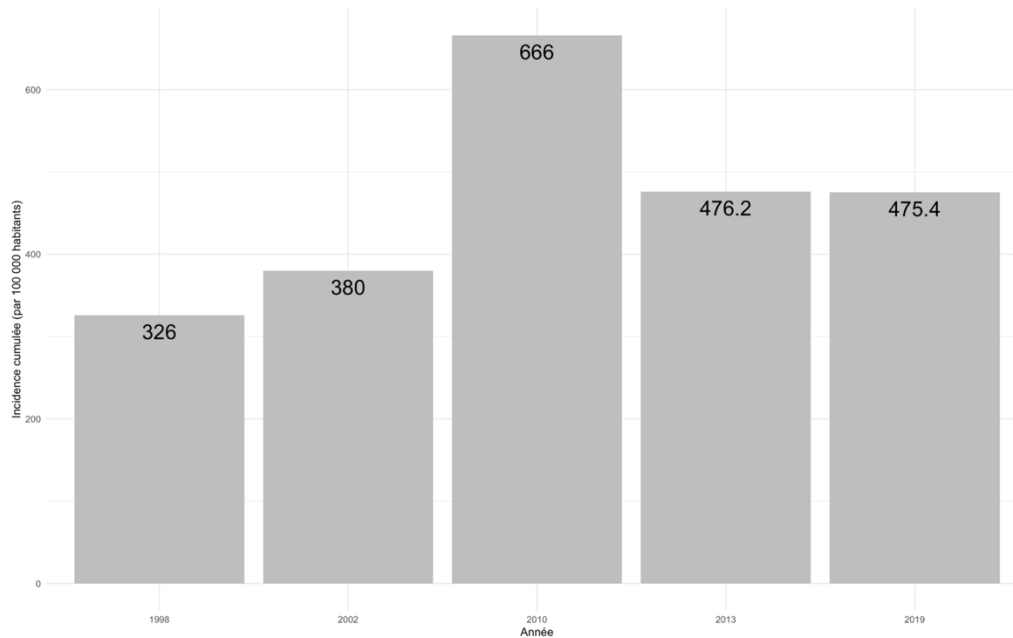
La population de la Colombie est d'environ 49 millions d'individus sur une superficie de 1 140 970 km<sup>2</sup>, ce qui résulte en une densité de population de 44 personnes par km<sup>2</sup> <sup>173,174</sup>. L'espérance de vie de ses habitants est de 75 ans <sup>175</sup>. En 2018, les femmes comptent pour une proportion de 51.2% de la population totale <sup>176</sup>. En ce qui concerne l'âge, la population est majoritairement concentrée entre les 15 à 65 ans avec une proportion de 68.2%. L'âge médian est de 30.1 ans, relativement bas en comparaison au Canada (41.1 ans) <sup>177,178</sup>. Le statut socio-économique dépend d'une panoplie de facteurs, les plus fréquents étant le niveau de scolarisation, les revenus du ménage ainsi que le statut d'emploi <sup>179</sup>. Pour l'éducation, le taux d'alphabétisation est de 98.8% pour les 15 à 24 ans, de 95.2% pour les 15 ans et plus et de 83.8% pour les 65 ans et plus en 2019 <sup>180</sup>. Le nombre d'enfants et d'adolescents non scolarisés chute également à travers les années <sup>180</sup>. La différence de scolarisation n'est pas importante entre les sexes <sup>179</sup>. Pour le revenu des ménages, on rapporte que 4.9% de la population en 2011 se retrouve dans la tranche de pauvreté avec moins de 1.90\$ par jour <sup>180</sup>. En fait, pour la même année, le revenu annuel médian par habitant est de 6070\$ américain<sup>181</sup>. De plus, autour de 11% de la population était sans emploi et 40% possèdent des emplois dans le secteur informel <sup>176,179</sup>. En 2020, sur l'échelle d'index de GINI sur l'inégalité des revenus, la Colombie se situait à 0.542, 0 étant une égalité totale et 1 une inégalité complète

<sup>182</sup>. Il existe également 29% de disparité de posséder un emploi rémunéré entre les femmes et les hommes <sup>179</sup>. Pour ce qui en est du système de santé du pays, la Colombie présente une structure très variée en qualité et en accessibilité en fonction de la localisation, certains soins doivent être payés, et ce, même en situation d'urgence<sup>175</sup>. Toutefois, les résidents bénéficient d'un régime d'assurance médicale intitulé *Entidades Promotoras de Salud (EPS)* à bas prix <sup>183</sup>. L'étude de Rodriguez et al., a estimé les dépenses liées à la maladie selon les stades en Colombie<sup>1</sup>.

**Tableau 1.** Coûts moyens (en dollar américain) en matière de santé liée à une infection dengue selon les différents stades pour un ménage en Colombie en 2012<sup>1</sup>

Catégories de dépenses	Dépenses moyennes en dollars américains		
	Cas de fièvre de dengue ambulatoire	Cas de fièvre de la dengue hospitalisée	Cas de dengue sévère/ Hémorragique
Hospitalisation	0	21.7	38.6
Frais du médecin	1.7	1.6	2.0
Copaiement	1.6	0.5	0.7
Tests laboratoires	1.8	1.3	3.1
Traitements	8.2	9.7	12.8

L'historique de la dengue avec la Colombie remonte en 1971 pour le premier cas de sérotype DENV-2, en 1975 pour le sérotype DENV-3, en 1977 pour le sérotype DENV-1 et en 1982 pour le sérotype DENV-4<sup>4,184</sup>. En 1989, le premier cas de dengue hémorragique a été rapporté <sup>184</sup>. Depuis, plusieurs épidémies ont eu lieu soit en 1998, 2002, 2010, 2013 et 2019 avec le record étant en 2010 selon l'étude de Gutierrez et al <sup>4</sup>. Les incidences présentées à la figure 1 ont été observées au sein de la population de la Colombie<sup>4</sup>.



**Figure 1.** Incidences cumulées annuelles en Colombie pour les années 1998, 2002, 2010, 2013 et 2019 rapportées par Gutierrez et al.<sup>4</sup>.

La prédominance des sérotypes a varié à travers les années, avec DENV-1 et DENV-2 prédominants la majorité des années<sup>4</sup>. D'ailleurs, l'épidémie la plus récente, soit 2019, était en grande partie causée par le sérotype DENV-1<sup>4</sup>. De façon globale, la région du pays centre est la plus affectée, comptant plus ou moins un tiers des cas au travers du pays<sup>4,27,185</sup>. Le groupe d'âge des 5 à 14 ans contribue en majorité aux infections dans le pays<sup>27</sup>. Le taux de létalité moyen de la dengue en Colombie est 4.8 fois plus élevé que celui dans les autres pays en Amérique, plaçant la Colombie au premier rang<sup>4</sup>. On attribue ces statistiques élevées à la variation climatique ainsi que les conditions sociales idéales<sup>4</sup>.

Étant donné l'intérêt de plusieurs nations à suivre la maladie de près sur un plan de prévention et contrôle, la dengue requiert une déclaration obligatoire au système national de surveillance pour de nombreux pays endémiques, dont la Colombie depuis 1980<sup>27</sup>. Au sein de ce pays, la surveillance épidémiologique se fait avec l'institut de santé national colombien<sup>185</sup>. À noter que la majorité des chiffres de la maladie demeurent sous-représentés dus à deux facteurs soit (1) la dépendance du compte sur les cas cliniques des patients nécessitant une attention médicale et (2) les sujets étant asymptomatiques ou minimalement symptomatiques ne nécessiteront pas de soins<sup>110</sup>. L'objectif du gouvernement colombien en matière de taux de létalité

des cas de dengue sévère de moins de 2 % a été dépassé au cours des 10 dernières années avec 6,2 % en 2012 et 14 % en 2016, ce qui rend la situation encore plus préoccupante <sup>110</sup>.

## **2.8 Méthodes statistiques spatio-temporelles**

Plusieurs études portant sur la modélisation statistique de la dengue ont considéré des méthodes spatio-temporelles. Les méthodologies de chacune diffèrent selon l'objectif, les types de données disponibles, les covariables, l'échelle de l'étude et la localisation. Le tableau 2 présente un résumé des méthodes de différentes études. On remarque qu'en général que les modèles linéaires généralisés (GLM) sont les plus utilisées, suivie par modèles non linéaires à décalage distribué (DLNM). À noter qu'une variable à décalage réfère à une variable basée créée à partir des valeurs passées de la variable d'origine<sup>1</sup>. De celles retenues, uniquement deux études ont utilisé les modèles additifs généralisés (GAM) et le modèle de moyenne mobile intégré autorégressif (ARIMA). Les modèles GLM et ARIMA assument une relation linéaire entre la variable d'intérêt et les covariables; les covariables peuvent être des décalages de la variable d'intérêt. Tandis que les modèles DLNM et GAM assument aussi une dépendance non linéaire entre la variable d'intérêt et les covariables ; les covariables peuvent être des décalages de la variable d'intérêt. Le choix des modèles et leurs structures dépendent du but principal de chaque étude. Certaines de ces études ont plutôt regardé les changements de la dengue annuellement, mensuelles ou journaliers en se basant majoritairement sur des covariables environnementaux. Le tableau 3 détaille les covariables fréquemment utilisées dans la littérature.

En Colombie, des études spatio-temporelles sur la dengue ont été entreprises à une échelle nationale ou pour des régions spécifiques dont Cali, Medellin, Cartagena, Girardot. Toutefois, elles ne prennent pas toutes en compte les variables environnementales et aucune ne s'est concentrée sur le département de Méta. Tout comme les autres études dans le monde, les modèles linéaires généralisés sont les plus fréquents pour cet objectif. Le modèle de moyenne mobile intégrée autorégressif (ARIMA) mentionné plus haut a aussi été testé pour la dengue en Colombie en prenant compte des décalages.

**Tableau 2.** Méthodes d'analyses spatio-temporelles d'études antérieures portant sur la dengue

<b>Modèle utilisé</b>	<b>Études</b>
Modèles linéaires généralisés ( <i>Generalized Linear Model - GLM</i> )	Restrepo et al. 2014 ; Alkhaldy, 2016 ; Acharya et al., 2018 ; Bett et al. 2019 ; Gyawali et al., 2021 ; Acharya et al., 2016 Rohani et al., 2018 ; Shabbir et al., 2020 ; Faruk et al., 2022 ; Ogashawara et al., 2019 ; Cuong et al., 2013 ; Wangdi et al., 2018 ; Tsheten et al., 2020 ; Tuladhar et al., 2019 ; Hii et al., 2009 ; Dhewantara et al., 2019 ; Sharmin et al., 2018 ; Ashmore, 2020 ; Gomes et al., 2012 ; Akter et al., 2019
Modèle additif généralisé ( <i>Generalized Additive Model - GAM</i> )	Zhang et al., 2019
Modèle de moyenne mobile intégré autorégressif ( <i>Autoregressive integrated moving average - ARIMA</i> )	Wu et al., 2007
Modèles non linéaires à décalage distribué ( <i>Distributed lag non-linear models - DLNM</i> )	Chien et al., 2014 ; Xiang et al., 2017 ; Liyanage et al., 2016 ; Gasparrini, 2011

**Tableau 3.** Prédicteurs utilisés dans l'analyse spatio-temporelle d'études antérieures

<b>Prédicteurs considérés</b>	<b>Études</b>
Température minimale quotidienne	Aswi et al., 2020 ; Bett et al., 2019 ; Chen et al., 2019 ; Gyawali et al., 2021 ; Shabbir et al., 2020 ; Tsheten et al., 2020 ; Alkhaldy, 2016 ; Wu et al., 2007 ; Rohani et al., 2018 ; Xiang et al., 2017 ; Tuladhar et al., 2019 ; Liu et al., 2018 ; Descloux et al., 2012
Température maximale quotidienne	Aswi et al., 2020 ; Chen et al., 2019 ; Gyawali et al., 2021 ; Henry et al., 2020 ; Shabbir et al., 2020 ; Tsheten et al., 2020 ; Alkhaldy, 2016 ; Wu et al., 2007 ; Rohani et al., 2018 ; Xiang et al., 2017 ; Tuladhar et al., 2019 ; Liu et al., 2018 ; Descloux et al., 2012
Température ambiante quotidienne	Aswi et al., 2020 ; Chien et al., 2014 ; De Azevedo et al., 2020 ; Dhewantara et al., 2019 ; Restrepo et al., 2014 ; Riad et al., 2021 ; Zheng et al., 2019 ; Alkhaldy, 2016 ; Wu et al., 2007 ; Faruk et al., 2022 ; Ogashawara et al., 2019 ; Francisco et al., 2021 ; Liu et al., 2018 ; Liyanage et al., 2016 ; Descloux et al., 2012 ; Sharmin et al., 2018 ;
Humidité relative (et moyenne)	Aswi et al., 2020 ; Chen et al., 2019 ; Dhewantara et al., 2019 ; Tsheten et al., 2020 ; Zheng et al., 2019 ; Alkhaldy, 2016 ; Wu et al., 2007 ; Faruk et al., 2022 ; Rohani et al., 2018 ; Tuladhar et al., 2019 ; Xiang et al., 2017 ; Liu et al., 2018 ; Descloux et al., 2012



Précipitations	Aswi et al., 2020 ; Bett et al., 2019 ; Chien et al., 2014 ; De Azevedo et al., 2020 ; Dhewantara et al., 2019 ; Gyawali et al., 2021 ; Henry et al., 2020 ; Restrepo et al., 2014 ; Riad et al., 2021 ; Shabbir et al., 2020 ; Tsheten et al., 2020 ; Zheng et al., 2019 ; Wu et al., 2007 ; Faruk et al., 2022 ; Rohani et al., 2018 ; Ogashawara et al., 2019 ; Tuladhar et al., 2019 ; Francisco et al., 2021 ; Liu et al., 2018 ; Liyanage et al., 2016 ; Descloux et al., 2012 ; Sharmin et al., 2018
Superficie sous agglomération urbaine/zones de construction	Bett et al., 2019
Altitude, élévation	Dhewantara et al., 2019 ; Gyawali et al., 2021 ; Restrepo et al., 2014 ; Shabbir et al., 2020
Pression atmosphérique	Chen et al., 2019 ; Faruk et al., 2022
Population (densité populationnelle)	Chen et al., 2019 ; Dhewantara et al., 2019 ; Henry et al., 2020 ; Shabbir et al., 2020 ; Faruk et al., 2022
Âge de la communauté	Chen et al., 2019
Densité du réseau routier	Chen et al., 2019
Densité dans le métro	Chen et al., 2019
Superficie des étangs	Chen et al., 2019
Variation de température diurne	De Azevedo et al., 2020 ; Francisco et al., 2021 ; Sharmin et al., 2018
Composante de couverture terrestre, indice de végétation par différence normalisée ou végétation	Henry et al., 2020 ; Zheng et al., 2019 ; Francisco et al., 2021
Densité et mouvement des hôtes	Riad et al., 2021
Hygiène	Shabbir et al., 2020
Hôpitaux	Shabbir et al., 2020
Alphabétisation	Shabbir et al., 2020
Clarté du ciel	Faruk et al., 2022
Vitesse du vent	Faruk et al., 2022 ; Xiang et al., 2017
Indice de pollution atmosphérique de la semaine précédente	Rohani et al., 2018
Durée d'ensoleillement	Xiang et al., 2017

Comme remarqué dans le Tableau 3, plusieurs prédictors font leur apparition à maintes reprises. Précipitations, humidité, pression atmosphérique, élévation/altitude, température minimale, maximale et moyenne sont les plus communs. Parmi les prédictors atypiques, on compte la superficie sous agglomération urbaine/zones de construction, les hôpitaux proximaux, l'hygiène, l'alphabétisation, la densité populationnelle dans la catégorie socioéconomique ou sociodémographique et la composante de couverture terrestre, le *Water-Associated Disease Index*,

la température diurnal, l'indice de végétation par différence normalisée, la végétation, la durée d'ensoleillement et la vitesse maximale du vent, la densité et mouvement des hôtes et l'indice de pollution atmosphérique de la semaine précédente.

Les méthodologies utilisées précédemment ont permis des conclusions sur l'impact des covariables environnementales sur la fluctuation de la maladie de la dengue. Cependant, ces modèles présentent des limites quant à la compréhension plus fine de la dynamique de la maladie. En effet, aucun de ces modèles ne permet l'explication des changements entre les périodes à faibles cas, les périodes avec un nombre de cas modéré et les périodes avec un nombre de cas élevé. Dans ce travail, nous allons considérer un modèle de Markov caché spatio-temporel à changement de régime (HMM, *hidden Markov Chain*). Il est fréquemment utilisé pour modéliser la progression d'une maladie, mais également dans d'autres domaines comme la bio-informatique. Non seulement les HMM offrent la possibilité d'étudier la transition non observable entre ces stades dans nos données (c.-à-d. périodes à faibles cas vers des périodes avec un nombre de cas élevé), mais ces modèles probabilistes sont applicables même lorsque les données sont rares <sup>1</sup>. Chaque observation est dépendante des précédentes. Le modèle sera décrit en profondeur dans le chapitre suivant à la section 3.4.2.

## **2.9 Sommaire de recension et formulation de la question de recherche**

En somme, les études jusqu'à ce jour nous ont prouvé que la dengue, une maladie prenant davantage d'ampleur dans le monde, est endémique en Colombie. Nous savons que Meta, Tolima, Huila, Santander et Casanare sont des départements de Colombie en état d'alerte où les cas de dengue sont centrés (50% des cas nationaux en 2019) <sup>185</sup>. Toutefois, Meta demeure à la tête du fardeau d'où l'importance d'élucider ses tendances face à la maladie. Nous remarquons un manque quant au niveau de profondeur du savoir pour ce département. Il nous est connu que ce département ait témoigné des incidences élevées quant à cette maladie vectorielle à travers la dernière décennie sans forcément connaître les périodes et les emplacements géographiques à haut risque. Les prédicteurs ont certes été testés au sein de diverses régions dans le monde avec certaines divergences entre elles. Il est donc nécessaire de clarifier lesquels sont pertinents à Méta.

À la lumière des connaissances présentes dans la littérature, il faut remédier au manque d'information sur le lien potentiel entre les variables environnementales et les incidences de la dengue au Méta. Spécifiquement, une comparaison des municipalités permettrait de cerner les régions et les périodes où centrer l'implémentation future de programmes de sensibilisation.

## 2.10 Objectifs de recherche

### **Objectif général :**

Décrire la distribution spatio-temporelle de la dengue dans le département Méta de la Colombie en concordance avec des prédictors environnementaux importants.

### **Objectifs spécifiques :**

- i. Examiner la tendance de l'incidence hebdomadaire de la dengue à travers 29 municipalités du département Meta de façon individuelle et globale de 2011-2019
  
- ii. Identifier les prédictors météorologiques et environnementaux significatifs (p. ex., précipitations, température ambiante, température du point de rosée, pression au niveau de la mer) ainsi que leurs décalages influençant l'incidence de la dengue à travers le temps et l'espace et les utiliser pour une description exhaustive de la fluctuation de la maladie

## **Chapitre 3 : Données et méthodologie**

Compte tenu de la revue de littérature précédente, ce chapitre a comme but la description des variables, des bases de données et des méthodes qui seront utilisées pour la description des données et la modélisation spatio-temporelle de la dengue en Colombie.

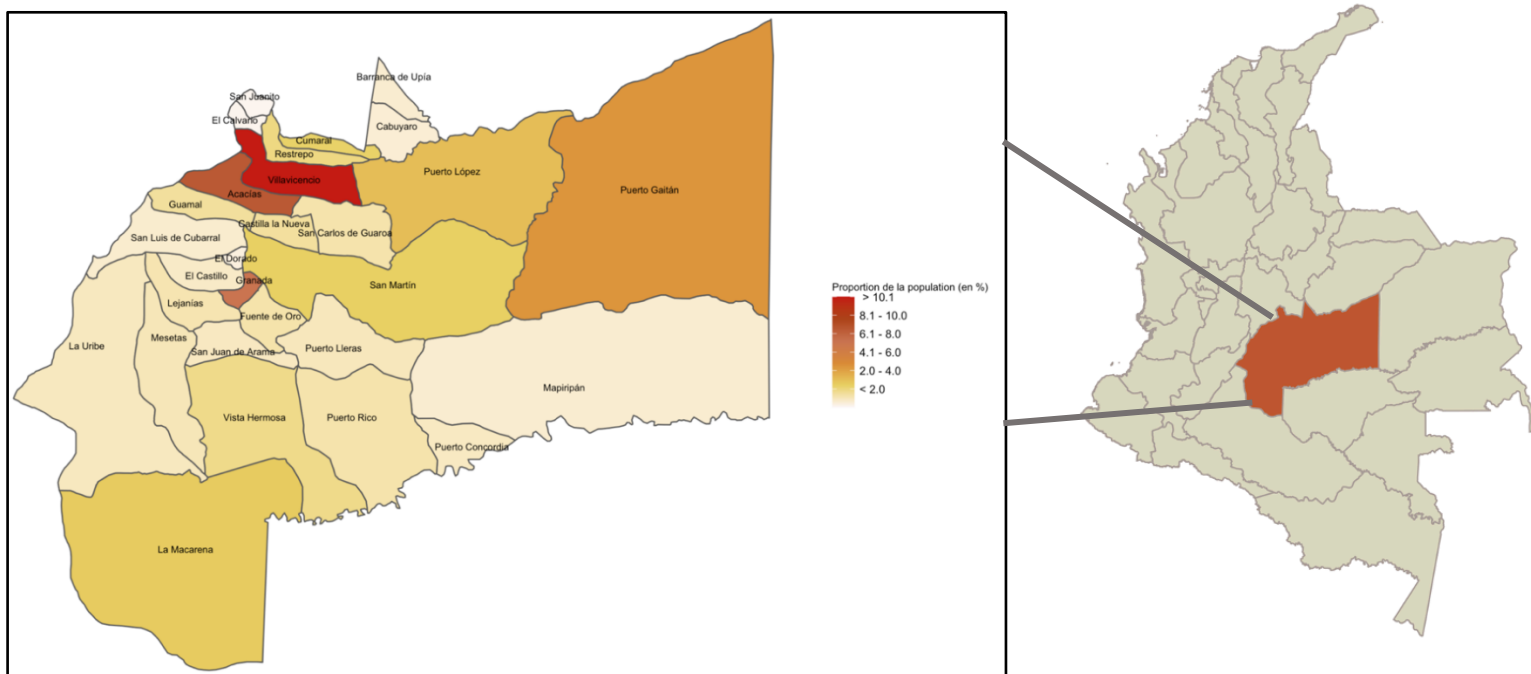
### **3.1. Devis d'étude**

Ce mémoire est de nature descriptive écologique et s'insère dans un projet de plus grande ampleur menée par Dr Kate Zinszer, financé par les IRSC, et portant sur la modélisation d'arbovirus en Colombie, incluant la dengue, Chikungunya et Zika. L'unité écologique dans notre cas est le département Méta et ses 29 municipalités. Étant donné la nature agrégée et non individuelle des données à l'usage, les préoccupations éthiques sont réduites. Ce projet possède tout de même une approbation éthique de l'Université de Montréal.

### **3.2 Population à l'étude**

Cette étude s'est focalisée sur les habitants de Méta, un département au centre de la Colombie englobant 29 municipalités, dont la capitale Villavicencio. Une liste complète de ses municipalités se retrouve en Annexe B. Il est situé à des coordonnées de 3.2720° N, 73.0877° O et possède une superficie de 85635 km<sup>2</sup>, comptant 7.49% du territoire national. L'écosystème de la région comprend une savane tropicale avec des forêts et des zones humides le long des rivières. Le territoire compte 80% de plaines couvertes de végétation<sup>1</sup>. Meta est le quatrième plus grand département de la Colombie avec 29 municipalités (Figure 2) et possède une population totale de 919 129 habitants et une densité de 11.44 habitants/km<sup>2</sup>. Villavicencio, est la plus peuplée du département avec environ 450 000 individus (49.09% de la population de Meta) suivie d'Acacias avec 78 000 (8.51% de la population de Meta) et Granada avec 65 000 (7.06% de la population de Meta)<sup>174</sup>. La répartition populationnelle de chacune des 29 municipalités du département basé sur le recensement du Département administratif national des statistiques de Colombie de 2018 est visualisée dans la figure 2 ci-dessous. Vis-à-vis de la dengue, on juge que les conditions environnementales idéales de cette région sont à la source du nombre accru d'incidence. On rapporte également que ceci est aggravé par les saisons sèches qui forcent les résidents à entreposer l'eau dans des contenants et ainsi créent davantage de milieux de reproduction pour les vecteurs. La période pluvieuse à Méta est fixée de mai à octobre<sup>1</sup>. Le reste de l'année est caractérisée par

une période sèche, avec le mois de janvier étant le mois le plus sec <sup>1</sup>. Les tendances annuelles de la dengue au sein de Méta ne sont pas élucidées concrètement par les études existantes.



**Figure 2.** Carte géographique des municipalités du département de Méta en Colombie avec la proportion de la population de chacune d'entre elles.

### 3.3 Conceptualisation des variables et source des données

#### 3.3.1 Variable d'issue

La variable d'issue est l'incidence de la dengue par municipalité de Méta. Le programme de surveillance nationale issu de l'*Instituto Nacional de Salud* en Colombie, SIVIGILA, a permis l'obtention des données discrètes de cas de dengue hebdomadaire pour les années 2011 à 2019 utilisées dans le cadre de ce projet. Étant certifié comme un processus hautement fiable statistiquement par la Direction Administrative Nationale de la Statistique (DANE), ce système moderne est publiquement disponible et couvre les 32 départements colombiens. Il comprend les cas de dengue et dengue hémorragique rapportés au niveau municipal et départemental de l'ensemble des établissements de santé publique par l'entremise d'une plateforme électronique. Ce recueil de données est entrepris à chaque semaine épidémiologique, soit du dimanche au samedi. Le département de santé publique reçoit la notification des cas de dengue des médecins et

des laboratoires et se charge de notifier les entités gouvernementales fédérales. Ces cas représentent les cas de dengue hebdomadaires totaux confirmés par des critères de laboratoires de diagnostic de la maladie. Parmi les méthodes d'usage, on compte les tests PCR, l'isolation virale et ELISA qui sont choisis selon le stade des symptômes. Le diagnostic clinique est une autre méthode considérée dans les données utilisées.

### **3.3.2 Variables prédictives**

Les variables prédictives de ce projet de mémoire sont les suivantes : (1) la précipitation moyenne hebdomadaire, (2) la température ambiante hebdomadaire moyenne de l'air, (3) la température moyenne hebdomadaire du point de rosée (TPR) et (4) la pression hebdomadaire moyenne au niveau de la mer. Elles ont été recueillies en tant que données moyennes hebdomadaires sur le *Google Earth Engine* afin de répondre à l'objectif 2. Les données de télédétection environnementales et météorologiques agrégées spatialement et temporellement comprennent celles des 29 municipalités du département de Méta entre le 1er janvier 2010 et le 09 juillet 2020 recueillies du produit *ERA5 Daily Aggregates* à une résolution spatiale de 27830 mètres créée par *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) / Copernicus Climate Change Service*. Pour ces données, nous avons choisi d'étendre la période d'intérêt à l'année 2010 étant donné la possibilité d'un effet décalée des variables climatiques sur la maladie. À noter que ces données proviennent de réanalyses combinant celles issues de modèles climatiques ainsi que les observations par satellite à une résolution de 30 km et sont de nature continue.

#### **3.3.2.1 Précipitations moyennes hebdomadaires (en millimètres)**

Les précipitations moyennes hebdomadaires sont calculées grâce à la moyenne du total quotidien de chaque municipalité de Méta.

#### **3.3.2.2 Température ambiante moyenne hebdomadaire de l'air (en °C)**

Bien explicite, cette covariable est une valeur hebdomadaire des moyennes quotidiennes de la température ambiante de l'air, qui sont elles aussi issues de valeurs horaires, de chaque municipalité du département Méta à deux mètres de hauteur.

#### **3.3.2.3 Température du point de rosée moyenne hebdomadaire (en °C)**

La température du point de rosée moyenne hebdomadaire (TPR) est aussi mesurée à deux mètres de hauteur et est calculée à partir de valeurs quotidiennes.

#### **3.3.2.4 Pression hebdomadaire moyenne au niveau de la mer (en Pascals)**

La pression hebdomadaire moyenne au niveau de la mer est calculée par des valeurs quotidiennes moyennes. Elle est définie comme la pression de l'air au niveau de la mer à une température de 15°C. Plus l'altitude augmente, plus la pression diminue<sup>188</sup>.

Afin de calculer les incidences de la dengue ainsi que la proportion de chaque municipalité nécessaire à l'objectif 1, nous avons eu recours au recensement du département Méta pour l'année 2018 par *The National Administrative Department of Statistics*<sup>1</sup>. Étant donné que les données de dengue, environnementales et climatiques sont encodées par le code municipal, nous avons eu recours à une liste indicative de *Saludcapital* indiquant les noms correspondant à chacun. Ces deux ressources ont été combinées à SIVIGILA et aux données environnementales. À noter que nous n'étions pas en présence de données manquantes dans aucune des bases de données.

### **3.4 Analyses des données et modélisation**

La nature descriptive de cette étude impose des procédés menant à l'investigation de la dengue selon le temps et l'espace. En d'autres mots, le but principal de notre méthodologie consiste à la description de la fréquence et la répartition de la dengue selon les covariables listées ci-dessus. À travers des analyses que nous avons entreprises, nous avons opté pour différentes échelles de temps et d'espace pour mettre en valeur les points que nous désirons étudiés ou illustrés. Ainsi, détaillées ci-bas, ces analyses prendront parfois en compte l'ensemble des municipalités de Méta avec des restrictions dans les échelles de temps. D'autres fois, elles seront plutôt concentrées sur des municipalités en particulier pour l'ensemble de la période d'intérêt. Ces choix ont été pris à des fins d'optimisation des questions de recherches analysées et pour faciliter les comparaisons.

#### **3.4.1 Analyse descriptive**

La présente partie vise une compréhension de la distribution et des tendances de chaque variable et prédicteur de façon individuelle et globale. Toutes les manipulations de cette section ont été entreprises dans le logiciel R version 4.0.3. Comme premier recours à la description des données, j'ai produit des statistiques descriptives résumant les tendances centrales et la dispersion dans les données. Pour représenter ces informations, des boîtes à moustaches ont été produites en combinant les observations hebdomadaires des 9 années à l'étude afin de visualiser la variabilité et la similarité des données des incidences cumulées de la dengue pour différentes périodes annuelles. Ceci a également été entrepris pour les données des précipitations moyennes, de la

température ambiante moyenne, de la TPR moyenne ainsi que de la pression au niveau de la mer moyenne.

Étant donné la forte composante saisonnière dans nos données qui se résume dans l'augmentation de l'incidence de la dengue dans la période de janvier à juillet, nous avons compartimenté les données en quatre périodes annuelles, soit la période en question en deux parties et deux autres la suivant. Ainsi, nous avons subdivisé les données de la sorte :

- Période 1 : janvier à avril ;
- Période 2 : mai à juillet ;
- Période 3 : août à octobre ;
- Période 4 : novembre à décembre.

Pour mieux comprendre l'aspect temporel des données, nous nous penchons sur leur décomposition en trois éléments additifs, qui est une procédure habituelle pour l'analyse des séries temporelles. Ces éléments sont la tendance, la saisonnalité et le résidu qu'on écrit également sous forme de formule :  $Y_t = S_t + T_t + R_t$  où  $Y_t$  représente la valeur observée,  $S_t$  représente la variation de la saisonnalité,  $T_t$  représente la tendance et  $R_t$  représente le résidu. Dans le cadre de cette analyse descriptive, aucun commentaire ne sera porté sur la composante du résidu.

La tendance a été visualisée par deux méthodes : des représentations graphiques et des cartes géographiques. Les courbes couvrent la période entière à l'étude et permettent l'observation de l'évolution de la variable d'intérêt, dont les croissances ainsi que les décroissances. Les cartes géographiques ont été générées pour les intervalles de temps suivants qui correspondent à des hausses ou baisses générales de l'incidence de la dengue : 2016-2019, 2017-2019, 2011-2015 et 2011-2016. La pente de la tendance des covariables environnementales et climatiques ont été aussi subdivisées de la même sorte. : 2016-2019, 2017-2019, 2010-2015 et 2010-2016. Une année supplémentaire a été ajoutée à la période d'étude de la dengue pour pouvoir prendre en compte des décalages pouvant influencer l'incidence. À noter que ces marges ont été compartimentées de sorte à couvrir le début et la fin de la période d'intérêt et également pour capturer toutes les tendances existantes vu leurs différences d'une municipalité à une autre. Afin de mettre de l'avant les tendances à la hausse et à la baisse, différents tons de couleurs ont été utilisés pour la borne positive et négative.

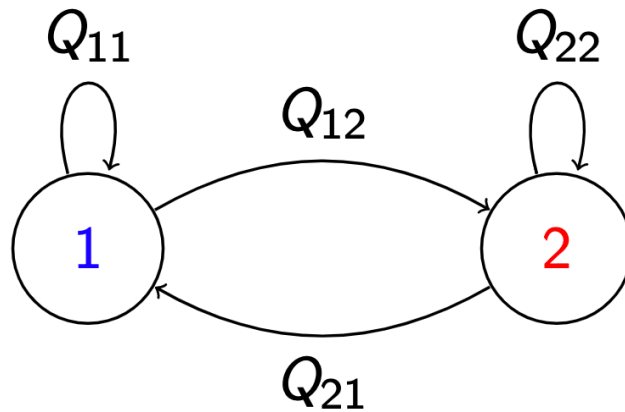
La saisonnalité quant à elle a été examinée par deux moyens : des courbes focalisées et des cartes géographiques. Les courbes exposant la saisonnalité ont été créées à la base de l'ensemble



des années, mais ont été présentées avec une focalisation sur la période de 2013 à 2016 pour faciliter l'analyse. Elles ont pour but la visualisation de près de la fluctuation annuelle de la saisonnalité. Pour les représentations géographiques de la saisonnalité, quatre cartes ont été générées pour chaque covariable : deux représentant la semaine moyenne où la saisonnalité est à son pic et à sa valeur minimale (pour les 9 années) et deux représentant la distance entre chaque municipalité et le reste du département pour la valeur minimale et maximale de la saisonnalité. D'abord, les semaines où la saisonnalité était à son pic et à son point minimum annuel pour l'année 2011 à 2019 ont été retrouvées. Nous avons débuté par une moyenne de ces valeurs pour chaque municipalité et chaque variable à l'étude pour l'ensemble des années. Pour ces semaines-ci de chaque année, c'est-à-dire 2 par année pour les 9 ans en question, nous nous sommes référées à leurs valeurs observées puis avons performé la moyenne de celles-ci avec les 4 points les précédant et les succédant. Cette dernière étape nous permet d'obtenir 9 valeurs pour le pic et 9 valeurs pour le point minimum pour chaque municipalité. De celles-ci, nous avons déduit la moyenne que nous avons comparée par la suite à la médiane de l'ensemble. Pour les sommets de chaque municipalité, nous avons utilisé la formule suivante : indice de différence = moyenne des pics et des 4 valeurs les précédant et succédant – médiane globale de l'ensemble. L'inverse a été fait pour les points minimums afin d'éviter des valeurs négatives : indice de différence = médiane globale de l'ensemble - moyenne des valeurs minimales et des 4 valeurs les précédant et succédant. Ces calculs ont permis de générer les deux autres cartes.

### 3.4.2 Modélisation des données

Pour étudier l'aspect temporel dans ce mémoire, les modèles de Markov cachés, soit le modèle à changement de régime (*hidden Markov Models, HMM*), ont été d'usage. Ce type de modèle a des propriétés très pertinentes pour la description des séries temporelles complexes. Les régimes sont en fait des variables latentes prenant en compte un nombre fini de valeurs et leur évolution temporelle se fait à l'aide d'une chaîne de Markov. Ayant choisi un régime  $j$  à une période donnée  $t$ , la loi de l'observation au temps  $t$  est une loi de densité  $f_{.j}$  (c.-à-d.. la loi ne dépend que du régime). La transition entre les régimes se fait en se basant sur la matrice de transition  $Q$  qui caractérise la probabilité de rester dans un régime  $j$  ou de passer d'un régime à l'autre. La figure 3 donne un schéma simplifié d'un modèle HMM.



**Figure 3.** HMM avec deux régimes 1 et 2 et une matrice de transition composée des éléments  $Q_{11}$ ,  $Q_{22}$  qui représentent respectivement les probabilités de rester dans le régime 1 et 2. Et  $Q_{12}$  et  $Q_{21}$  qui représentent les probabilités des transitions d'un régime à l'autre. Les observations dans un temps  $t$  se classifient dans un régime spécifique et ont une distribution spécifique. Supposant que nous considérons un modèle HMM avec distribution Poisson et deux régimes, les observations vont se classifier selon le régime 1 ou 2 et suivront des distributions de Poisson avec différents paramètres<sup>190</sup>.

Souvent, ces régimes ont des interprétations comme des régimes avec peu de cas de dengue ou un nombre de cas élevé. Contrairement aux méthodes usuelles présentées avant, les HMM permettent une compréhension assez fine des données caractérisant les changements de rupture dans les données. Contrairement aux modèles de type SARIMAX, le modèle HMM apporte une vision particulière puisqu'il permet une caractérisation des changements de rupture dans les données, soit le passage dynamique de hautes incidences (état 1) aux basses incidences (état 2) et vice-versa qui est caractérisé avec une matrice de transition et chaque état représente une distribution de probabilité différente (voir Figure 3). Dans les modèles SARIMAX, les états ont tous les mêmes distributions. Dans la littérature, il existe plusieurs modèles de type HMM. Dans ce mémoire, nous avons eu recours à des modèles qui prennent en considération des covariables non linéaires, HMMX avec des B-Spline<sup>192</sup>. Le choix des distributions, du nombre de régimes et des paramètres des B-Splines pour la variable d'intérêt et les covariables pour chaque site a été effectué en se basant sur les tests d'adéquation puissants fondés sur la statistique KS et CvM<sup>192</sup>. Plusieurs modèles ont été considérés comme les modèles HMMX avec une distribution Poisson, HMMX avec une distribution Poisson gonflée en 0, HMMX avec une distribution binomiale négative, et HMMX avec une distribution binomiale négative gonflée en 0. Nous avons aussi testé des modèles à 1, 2, 3, 4, 5, et 6 régimes pour toutes les variables étudiées et leurs décalages. Dans notre cas, le modèle qui ajustait bien nos données correspondait au modèle HMM de 4 régimes

avec une distribution Poisson. En ce qui concerne les risques relatifs présentés dans la section des résultats, ils ont été obtenus par l'application de la méthodologie de Gasparini et al. 2010 à notre modèle HMM<sup>192</sup>. Les calculs peuvent être reproduits en utilisant la librairie GenHMM1d disponible sur CRAN<sup>193</sup>. Dans ce travail, nous avons utilisé C++ et Matlab pour la partie modélisation pour assurer une optimisation de temps de calcul étant donné le nombre de sites, variables et décalages considérés. Les puissances de tests reliées à la taille d'échantillon et aux types d'analyses sont disponibles en Annexe C. Une description détaillée des méthodes de calculs pour ces fonctions est donnée dans l'article de Nasri et al. <sup>194</sup> et en Annexe D.

# Chapitre 4 : Résultats

## 4.1 Objectif 1

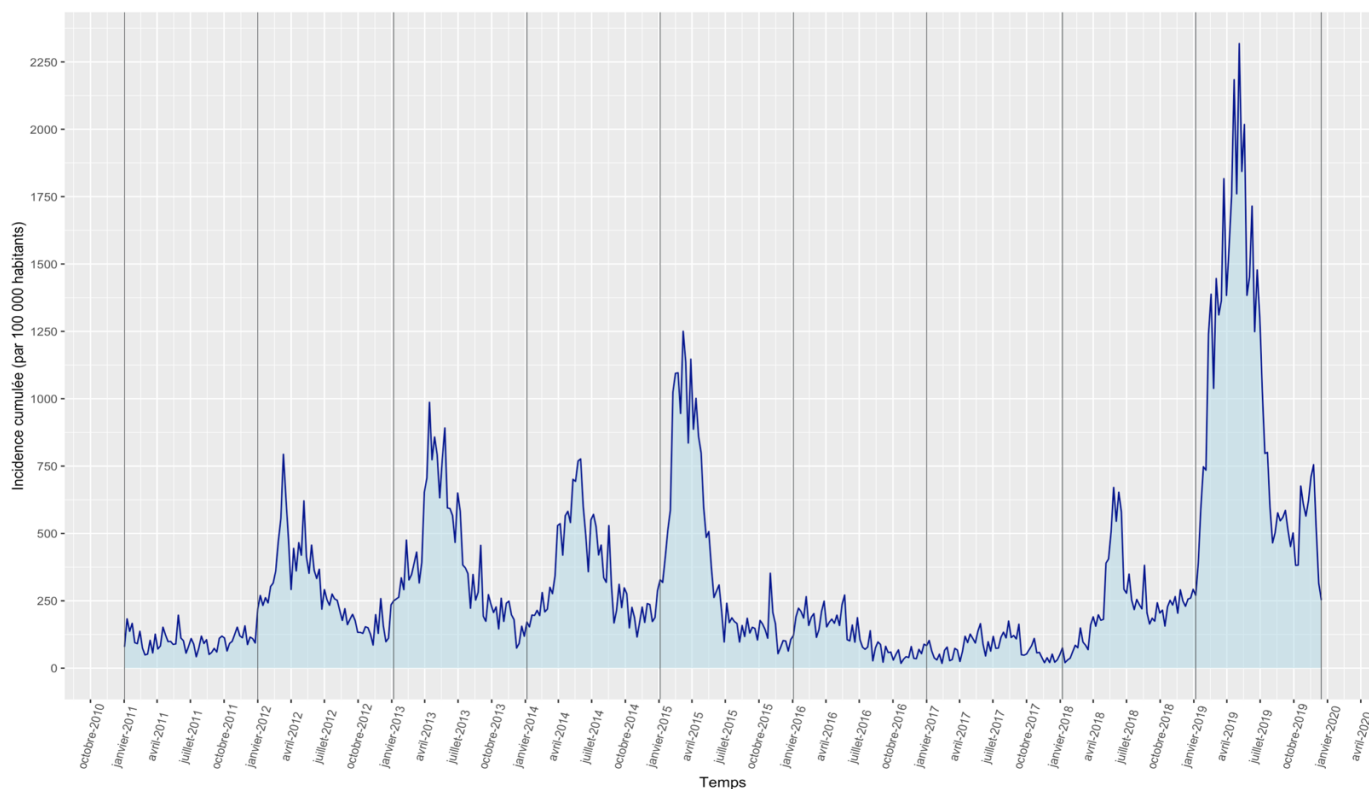
**Examiner la tendance de l'incidence hebdomadaire de la dengue à travers 29 municipalités du département Meta de façon individuelle et globale de 2011-2019**

### 4.1.1 Données sur la dengue

Cette section visant l'atteinte de l'objectif 1 détaille les résultats de nos manipulations descriptives. Grâce à plusieurs types de représentations, nous visons la description de l'incidence de la dengue et nos covariables d'intérêt. Nous aurons recours à la décomposition de séries temporelles additives qui nous aidera à comprendre les tendances et la saisonnalité au niveau temporel ainsi que des cartes géographiques qui nous aideront à visualiser l'aspect spatial.

#### 4.1.1.1 Évolution temporelle de la dengue à Méta

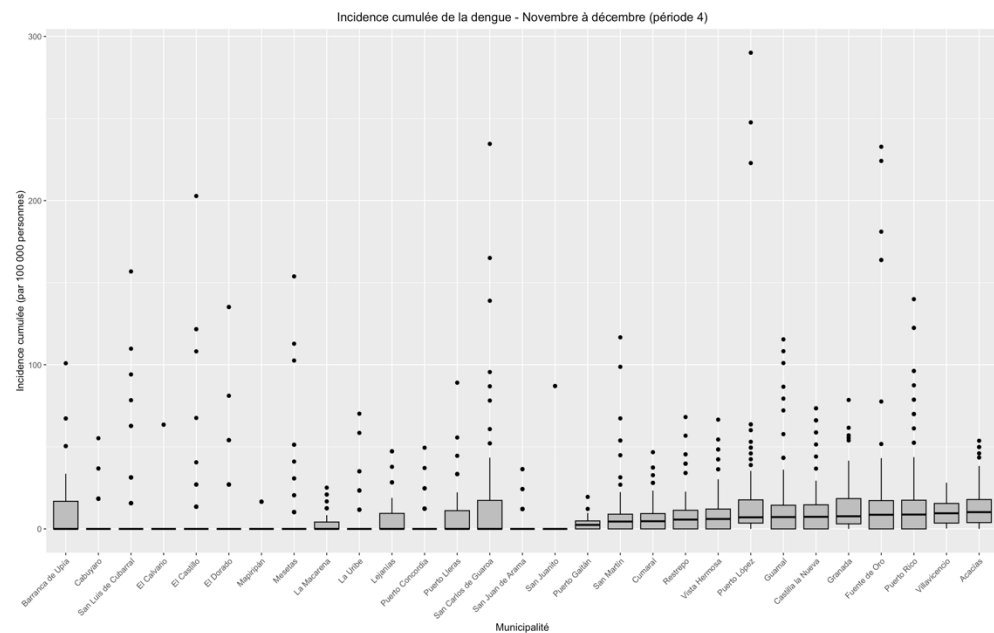
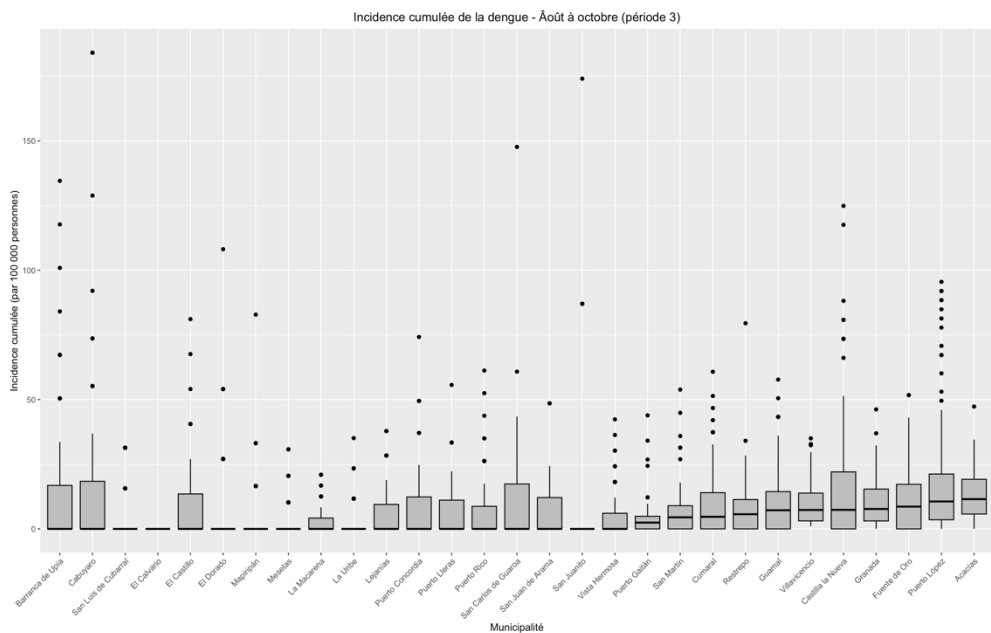
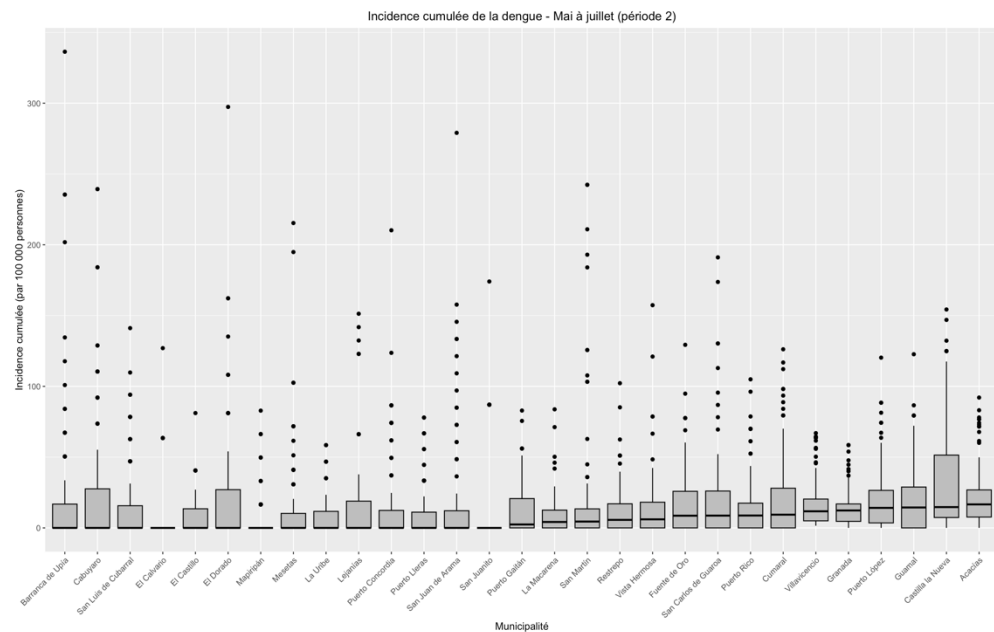
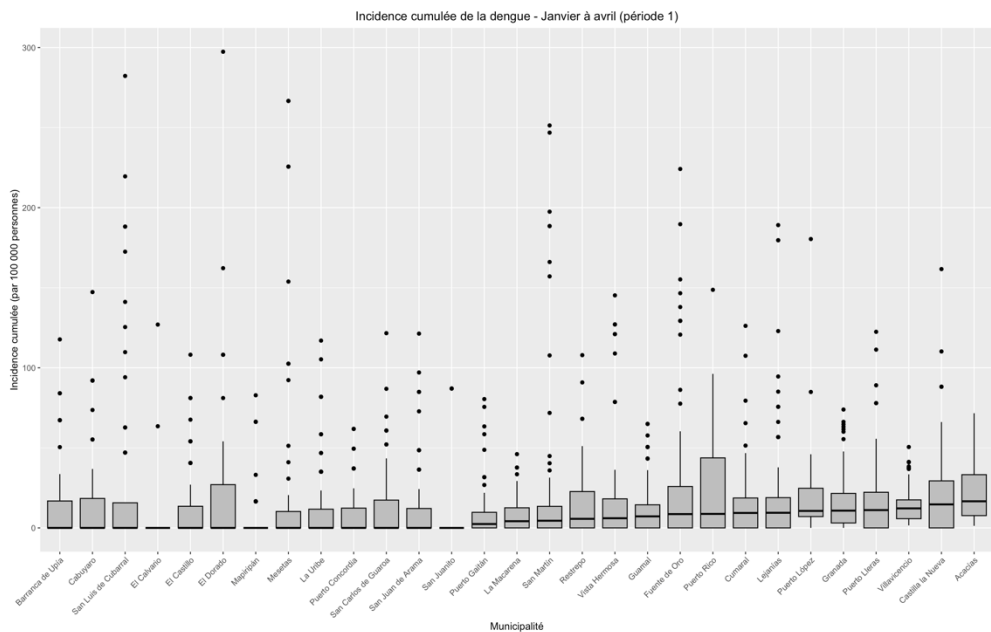
Tout d'abord, à la base des données agrégées au niveau départemental présentée à la figure 4, nous voyons que l'année 2019 détient le record quant à l'incidence de la dengue à Méta. À l'inverse, l'année 2016 et 2017 sont celles avec les IC les plus faibles dans notre période d'étude. Nous témoignons aussi que les pics pour chaque année sont touchés avant le mois de juillet. La fin d'année est fréquemment caractérisée par une décroissance de l'incidence.



**Figure 4.** Graphique illustrant l'évolution de l'incidence cumulée (IC) agrégée de dengue dans l'ensemble du département Meta entre 2011 et 2019.

#### **4.1.1.2 Distribution de l'incidence de la dengue par municipalité**

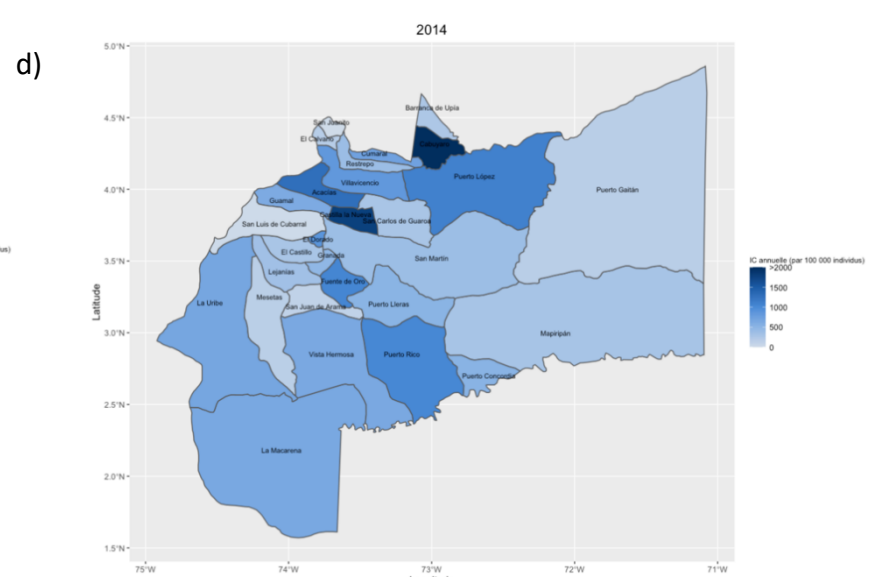
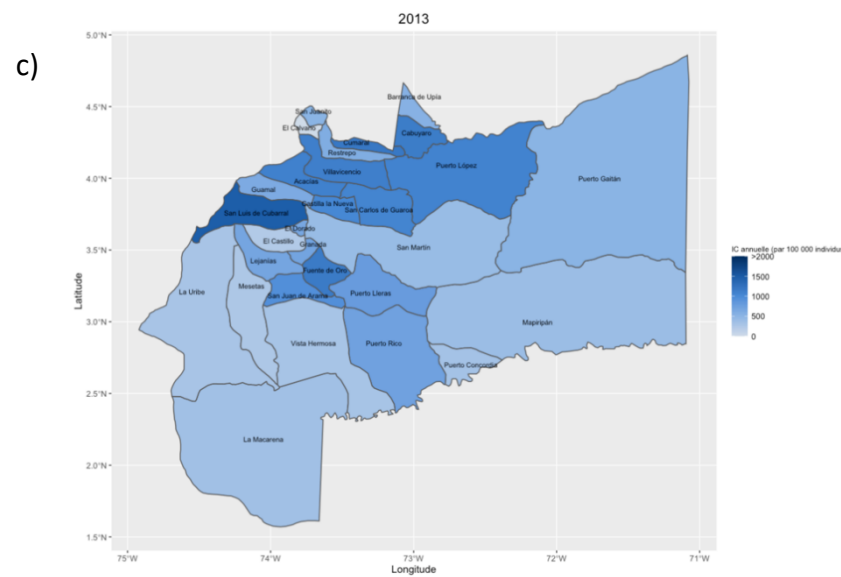
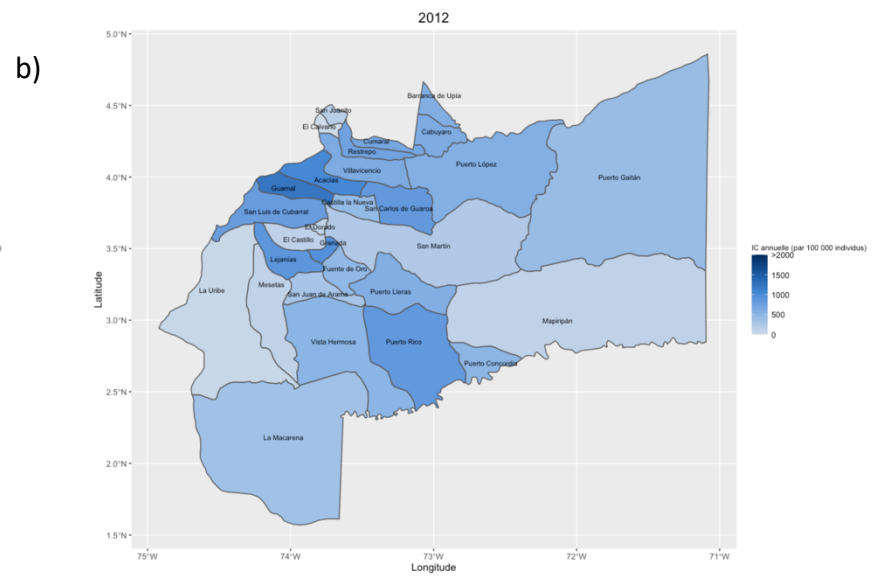
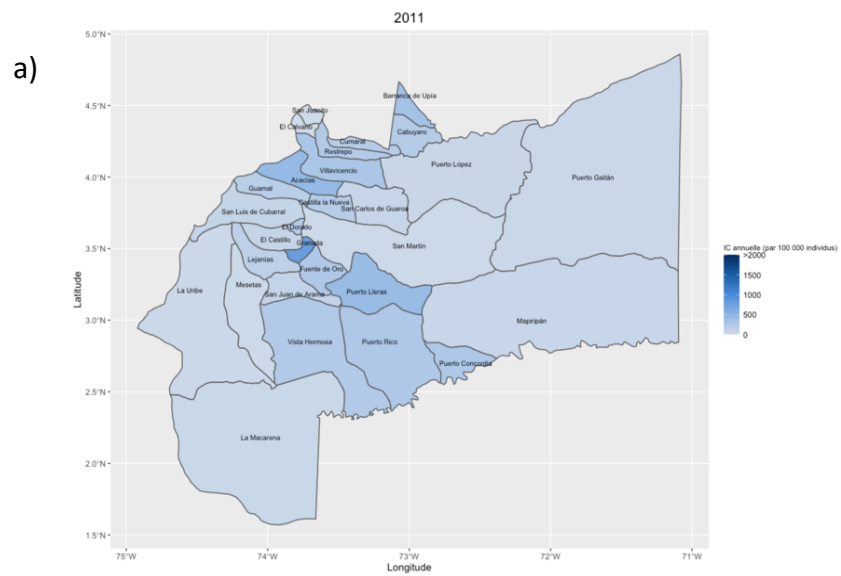
Les diagrammes de boîtes à moustache illustrés à la figure 5 dévoilent la distribution de la dengue selon les périodes pluvieuses retrouvées dans la littérature, typiquement de mai à octobre, dans Méta. Cette subdivision est essentielle afin d'observer la similarité des données par période toutes années combinées. Nous observons que les incidences de la dengue sont considérablement plus basses et concentrées dans la période d'août à octobre. La période de novembre à décembre présente les secondes plus basses incidences de dengue de l'année. En revanche, les périodes de janvier à avril ainsi que de mai à juillet sont comparables au niveau de l'incidence, avec des valeurs assez élevées et davantage de valeurs extrêmes.



**Figure 5.** Boîtes à moustaches représentant la distribution de l'incidence cumulée de la dengue pour quatre périodes annuelles des années 2011 à 2019 combinées à travers le département de Méta.

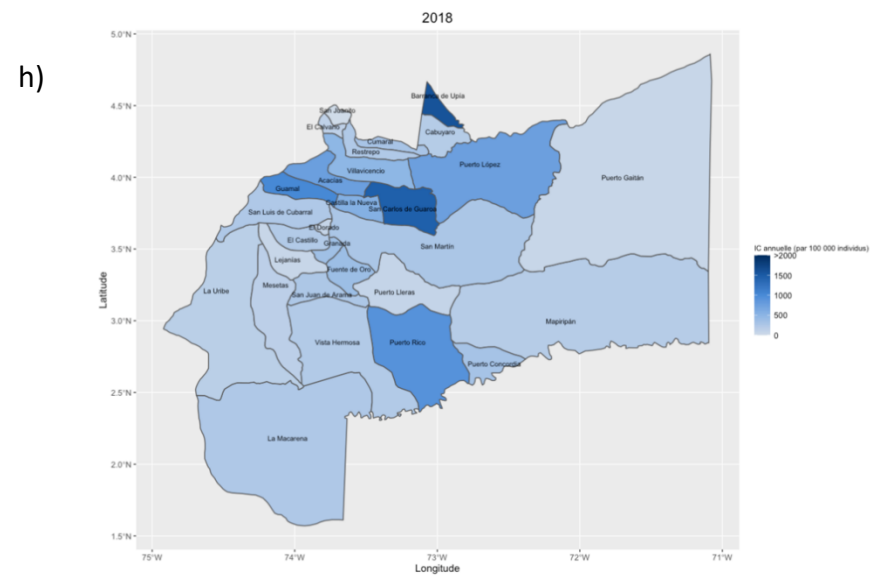
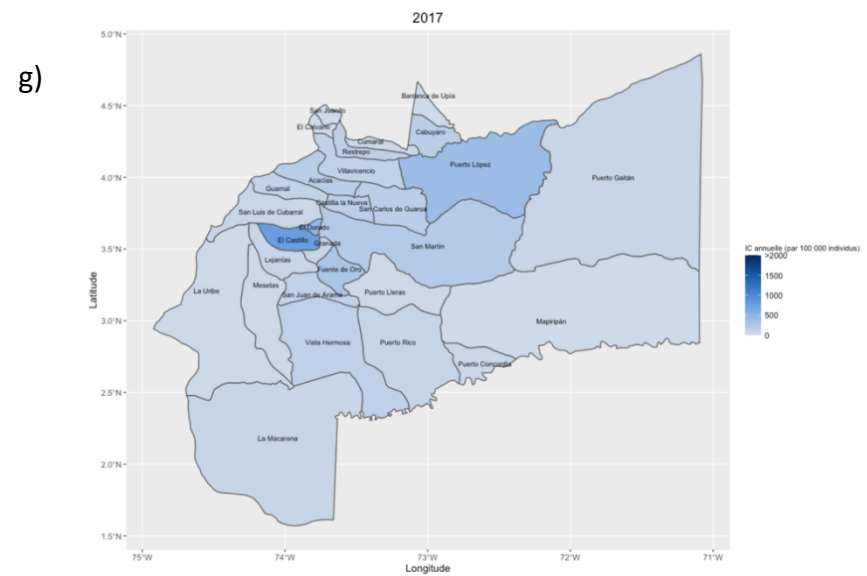
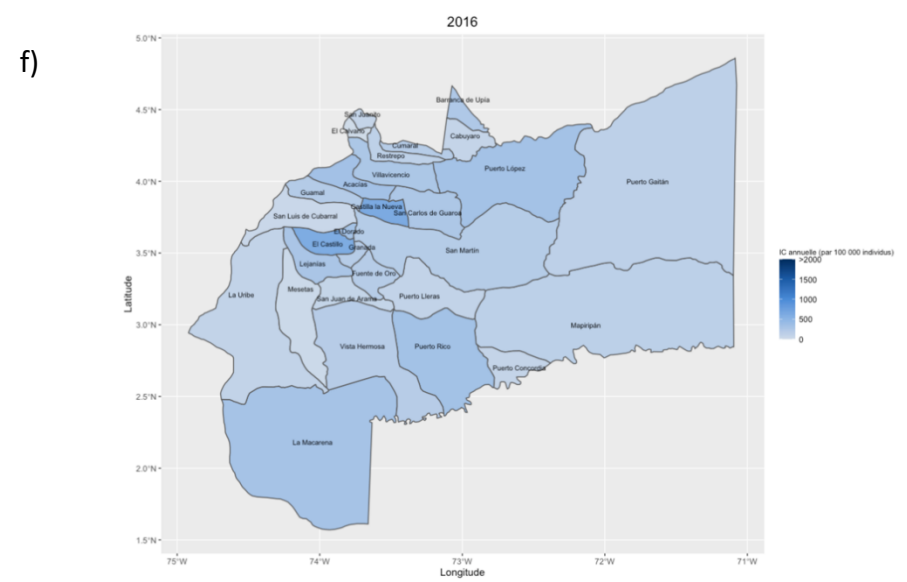
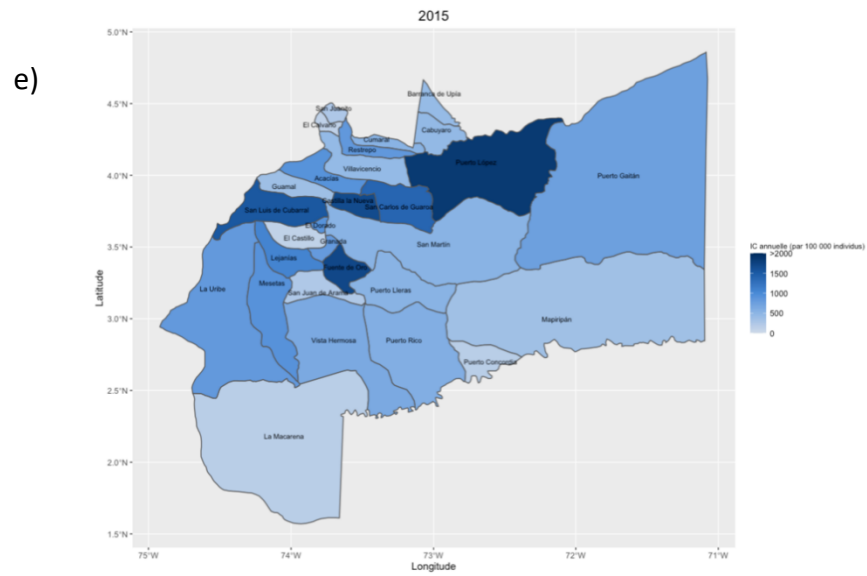
Considérant la période d'étude de 2011 à 2019, la figure 6 nous montre la distribution spatiale des incidences cumulées (IC) par an, une étape nous permettant d'approfondir les observations émises à la figure 4 avec une visualisation de la composante spatiale. Elle met en évidence que les années 2013, 2015 et 2019 étaient des années épidémiques du département. À l'inverse, les années 2011 et 2017 sont celles avec les IC annuelles les plus faibles. De 2017 à 2019, le département Méta subit une augmentation de l'incidence cumulée annuelle de 893.60%.

Comme le souligne la figure 6i, l'année 2019 s'est vu atteindre des niveaux d'IC très élevées dans de multiples municipalités, notamment dans la région centrale du département. À noter que les municipalités hautement affectées cette année-ci se retrouvent adjacentes les unes des autres. Les années 2013 et 2015 ont subi davantage de répercussions au nord du département. À travers les années, nous pouvons remarquer que le sud du département démontre des valeurs relativement basses, à l'exception de l'an 2019. La municipalité La Macarena en est un exemple.



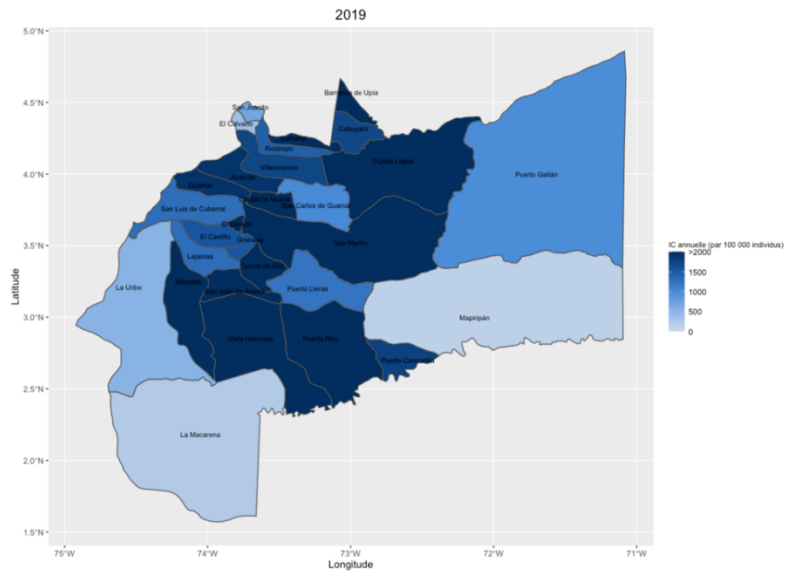
**Figure 6.** Cartes géographiques des incidences (IC) cumulées annuelles pour l'ensemble des municipalités du département Méta entre 2011 et 2019





**Figure 6.** Cartes géographiques des incidences (IC) cumulées annuelles pour l'ensemble des municipalités du département Méta entre 2011 et 2019 (suite).

i)



**Figure 6.** Cartes géographiques des incidences (IC) cumulées annuelles pour l'ensemble des municipalités du département Méta entre 2011 et 2019 (suite).

En somme, les années 2016, 2015, et 2013 représentent respectivement celles avec les records en incidence de dengue à Méta, tandis que les années 2017 et 2016, représentent les années ayant incidences cumulées les plus faibles. Annuellement, les incidences de la dengue sont faibles entre août et octobre puis en novembre et décembre. Le reste de l'année présente des incidences équitablement élevées, soit entre janvier et juillet. D'une façon spatiale, en 2019, on remarque que les hautes incidences cumulées sont au centre de Méta. Le même phénomène est observé au nord en 2013 et 2015. Le sud est généralement faible en incidence.

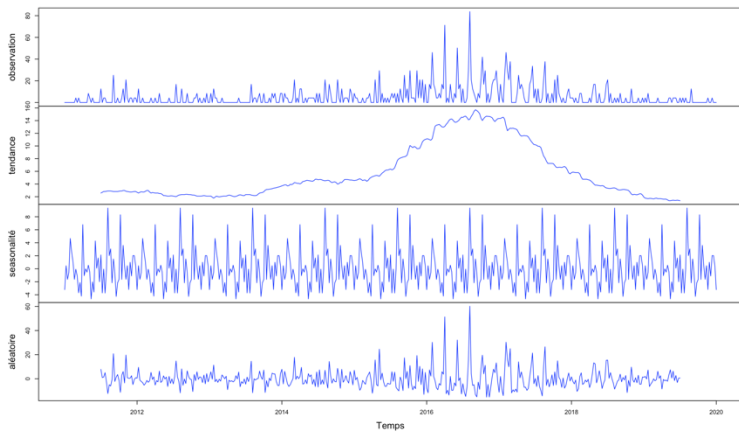
#### **4.1.1.3 Décomposition des séries chronologiques**

L'évolution des cas de dengue diffère considérablement d'une municipalité à l'autre. Pour mieux nous informer sur ces caractéristiques dans l'ensemble des municipalités, nous avons regroupé les municipalités par leurs similarités en ce qui a trait aux résultats et en avons sélectionné quelques-unes à titre d'exemple. Ceci a été entrepris par une revue de l'entièreté des résultats générés. La figure 7 démontre la décomposition de séries chronologiques.

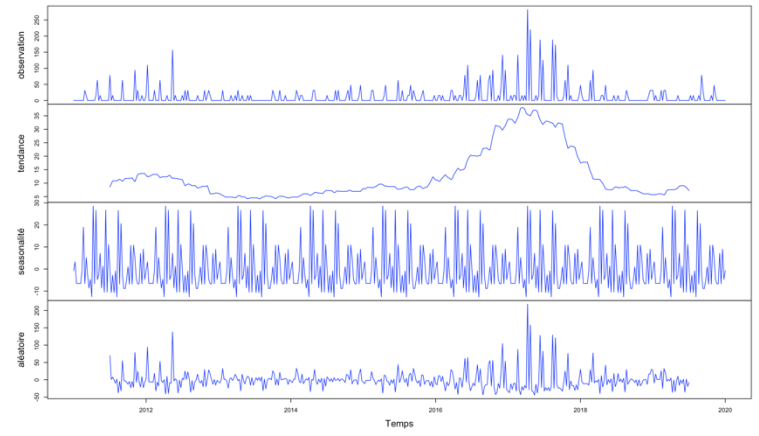
##### **4.1.1.3.1 Tendances**

La première composante élucidée par la décomposition, soit la tendance, a été représentée dans la figure 7 ainsi que par les cartes géographiques pour visualiser les tendances pour les différentes municipalités (figure 8). Ici, nous avons pris en compte l'ensemble de la période pour une compréhension globale des tendances à travers le temps. De façon générale, à travers le département, une croissance à partir de 2011 avec l'atteinte du sommet en début 2016 suivi d'une décroissance est observée. On témoigne de cette tendance à La Macarena (figure 7a), Villavicencio et plusieurs autres municipalités. La figure qui suit (figure 7b) dévoile une autre tendance existante au sein du département assez similaire à celle qui précède. Cependant, dans ce cas, le sommet est touché plus tardivement, soit en début de l'an 2017. Tel est le cas dans la municipalité de San Luis de Cubarral, Lejanias, Puerto Rico et Vistahermosa. Un pic davantage tardif de la tendance est témoigné dans les municipalités de Restrepo, El Castillo, Fuente de Oro, Mesetas, La Uribe et Puerto Lleras, soit en début 2018 (figure 7c). La figure 7d présente la tendance dans la municipalité d'El Calvario caractérisé par plusieurs points où une certaine persistance est maintenue avec les points maximum touchés entre 2016 et 2017. La municipalité de San Juanito (figure 7e) ne démontre aucune tendance consistante. Finalement, la figure 7f manifeste la tendance dans San Carlos de Guaroa, Acacias, Cabuyaro, Granada et Puerto Lopez. Elle est entre autres caractérisée par une croissance aux alentours de 2016, enchaînée d'une chute en 2018 et une réaugmentation de la tendance en 2019.

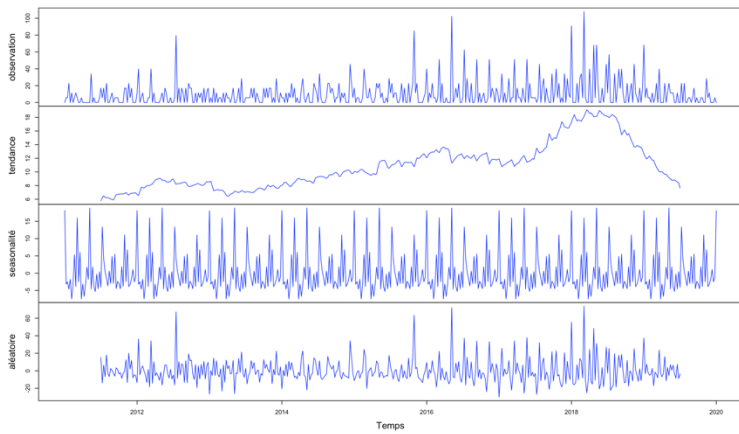
a) La Macarena



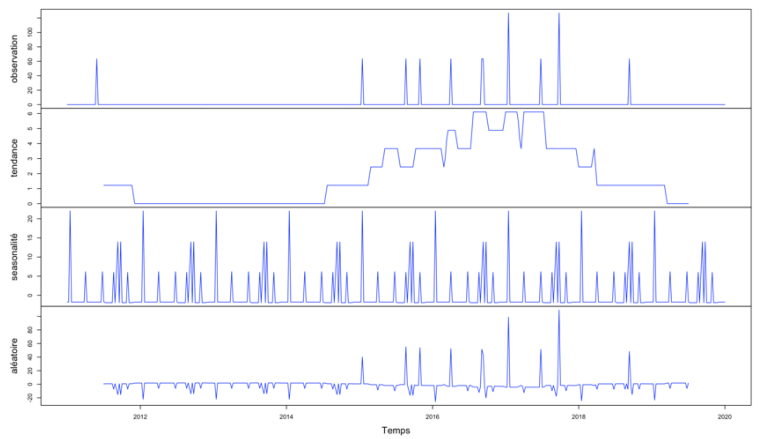
b) San Luis De Cubarral



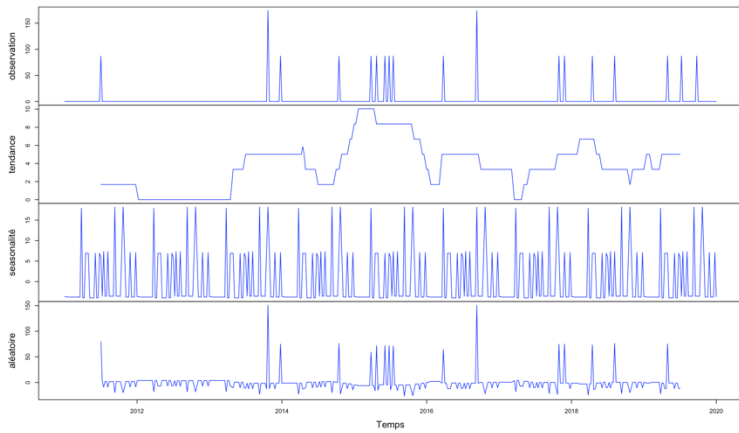
c) Restrepo



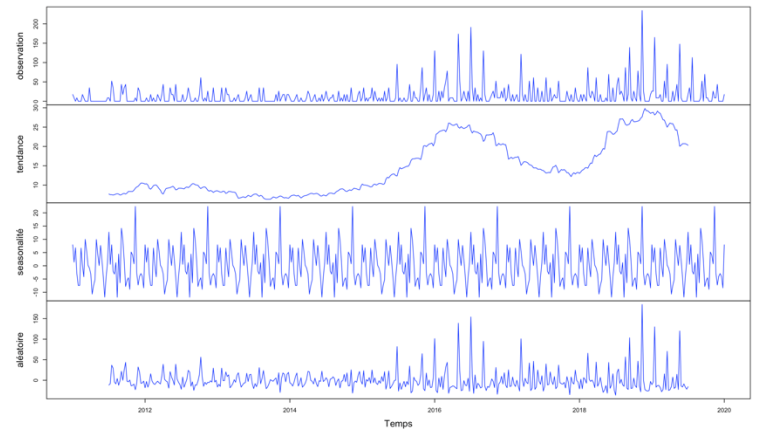
d) El Calvario



e) San Juanito



f) San Carlos De Guaroa

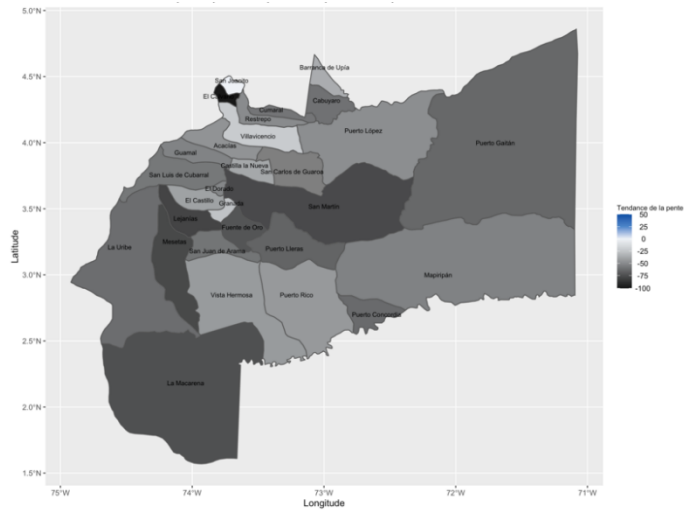
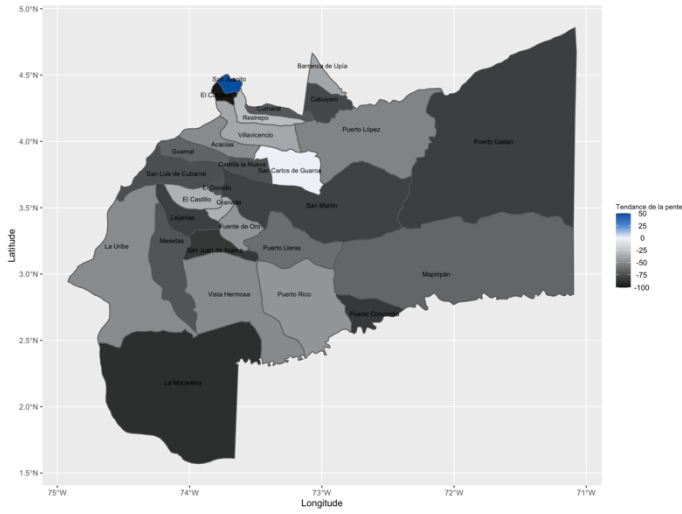


**Figure 7.** Décomposition de la série temporelle additive de la municipalité de (a) La Macarena, (b) San Luis de Cubarral, (c) Restrepo, (d) El Calvario, (e) San Juanito et (f) San Carlos de Guaroa représentant l'incidence de la dengue à travers les années à l'étude (2011-2019).

La figure 8 présente la distribution spatiale des pentes de la tendance pour l'incidence de la dengue entre 2016-2019, 2017-2019, 2011-2015 et 2011-2016. Ces marges ont été compartimentées de sorte à couvrir le début et la fin de la période d'intérêt. À noter que pour des raisons de grandes disparités entre les pentes des deux premières cartes géographiques et les suivantes, deux échelles distinctes ont été utilisées pour faciliter l'interprétation. Une tendance positive était une indication d'une croissance de l'incidence de la dengue, une tendance négative indique une décroissance de l'incidence et une tendance nulle ne signifiait aucun changement. Pour la première marge de 2016 à 2019 (figure 8a), on observe une majorité de tendances négatives à l'exception de San Juanito et San Carlos de Guaroa avec une tendance positive et nulle. El Calvario et La Macarena sont les municipalités avec les valeurs de pente les plus minimales. Entre 2017 et 2019 (figure 8b), aucune municipalité ne voit d'augmentation de l'incidence de la dengue à long terme. El Calvario présente la plus grande diminution à travers le département de Méta. Aucune dépendance géographique ne semble flagrante. En tenant compte des années 2011 à 2015 (figure 8c), la différence entre les municipalités se laisse remarquer, surtout vis-à-vis de Mapiripan qui consiste de la municipalité avec la pente de la tendance la plus élevée. Les autres municipalités possédant des pentes différentes de zéro ne se retrouvent pas adjacentes. La figure 8d couvrant les années 2011 à 2016 est assez similaire à la précédente. Encore une fois, la municipalité de Mapiripan voit la plus grande croissance à travers Méta et El Calvario démontre une décroissance. Le reste du département révèle des tendances homogènes, sans particularités.

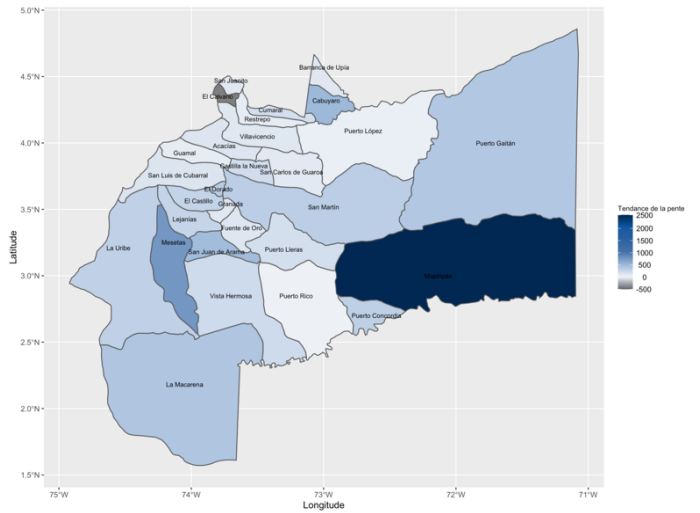
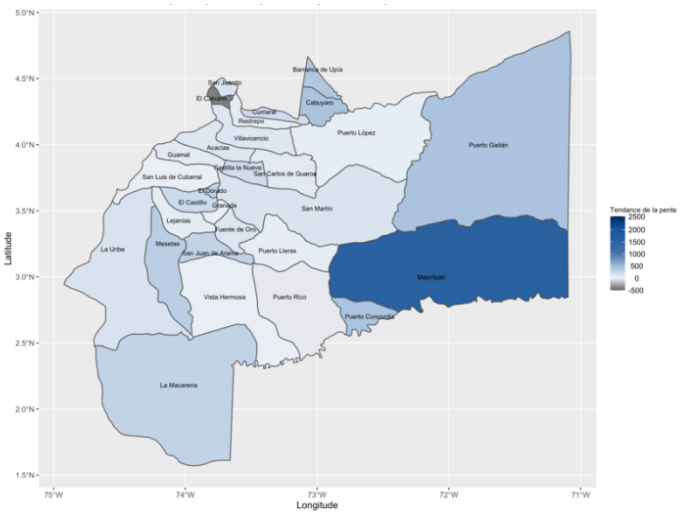
a) 2016-2019

b) 2017-2019



c) 2011-2015

d) 2011-2016



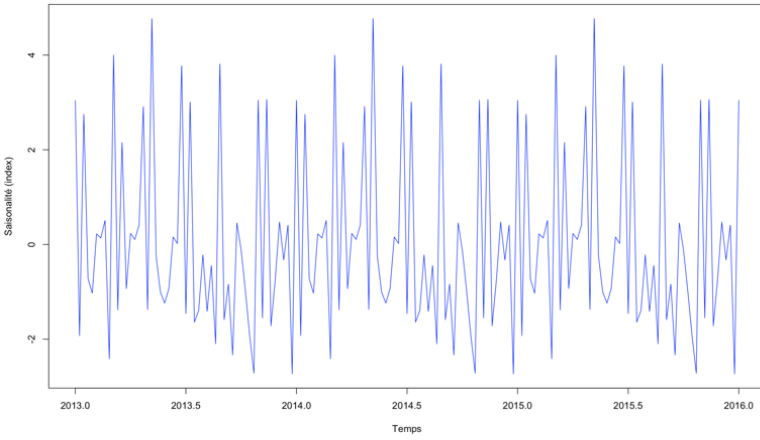
**Figure 8.** Cartes géographiques illustrant la tendance de la pente entre (a) 2016-2019, (b) 2017-2019, (c) 2011-2015 et (d) 2011-2016 de chaque municipalité du département de Méta.

\*Le gradient de couleur indique la pente de la tendance de l'incidence de la dengue dans chaque municipalité dans les années en question. Une pente positive indique une croissance et une pente négative indique une décroissance.

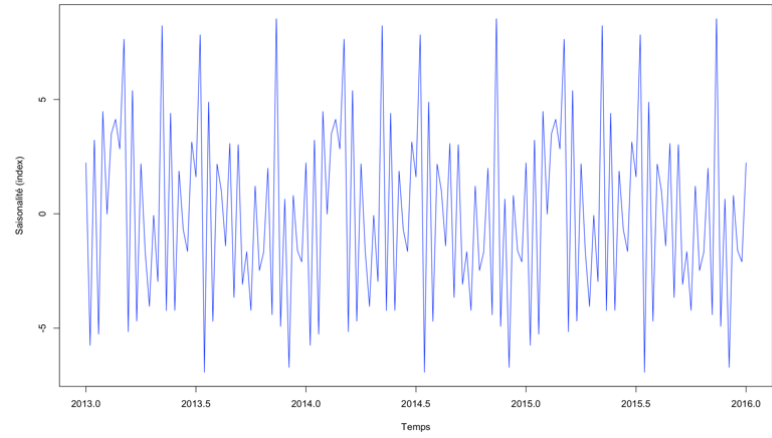
#### 4.1.1.3.2 Saisonnalité

La saisonnalité a elle aussi été illustrée de deux façons soit par des graphiques linéaires ainsi que par des cartes géographiques. Elle a également été regroupée selon douze types de résultats existants dans le département entre les années 2013 et 2016. Le point commun réunissant toutes les municipalités est l'effet saisonnier se répétant chaque année. Toutefois, les pics et les points minimaux diffèrent à travers le département. À titre d'exemple, Villavicencio (figure 9a) montre qu'à chaque début d'année, la municipalité voit sa valeur minimale atteinte. La valeur maximale quant à elle est touchée dans le deuxième quadrimestre. La municipalité El Calvario (figure 9e) se distingue dans la persistance de ses données dans le temps. On observe moins de variations qu'au sein des autres municipalités avec la valeur maximale atteinte en début chaque année. D'ailleurs, la saisonnalité est mesurée par un indice saisonnier correspondant à une moyenne qui compare les valeurs réelles à ce qu'elles seraient en l'absence de saisonnalité<sup>192</sup>. Cela dit, la municipalité San Juanito démontre un indice de saisonnalité similaire localisé entre -5 et 7 à l'exception des 3 hausses témoignées annuellement.

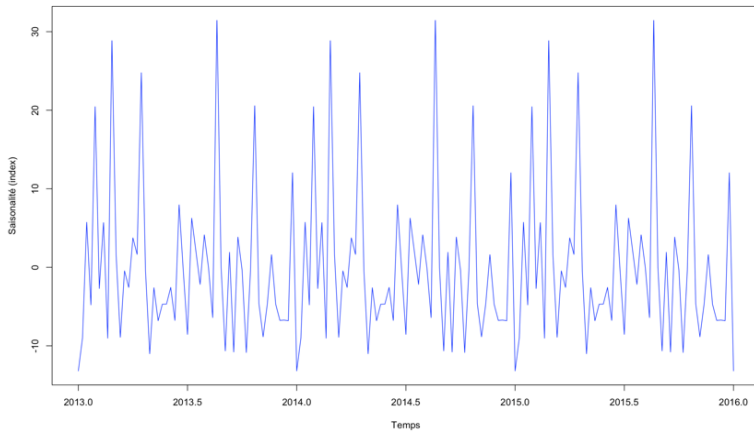
a) Villavicencio



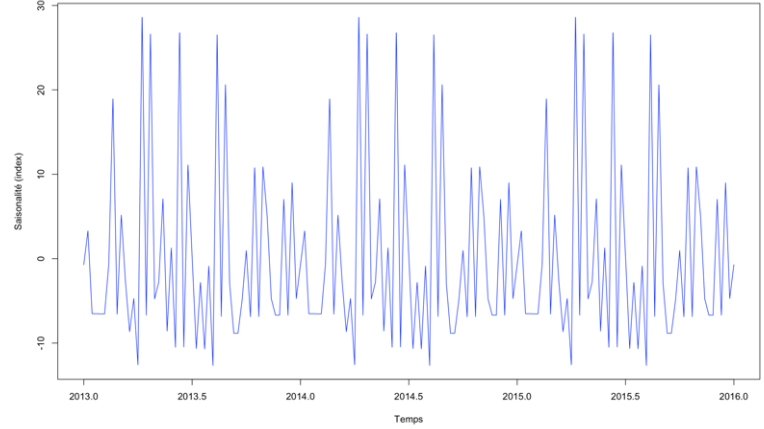
b) Acacias



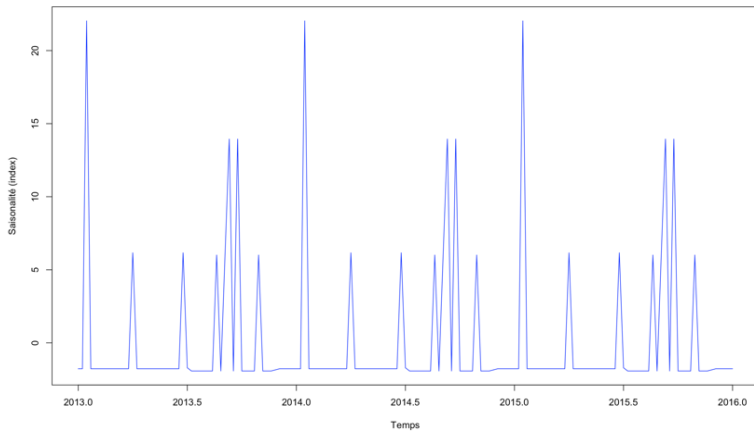
c) Barranca De Upia



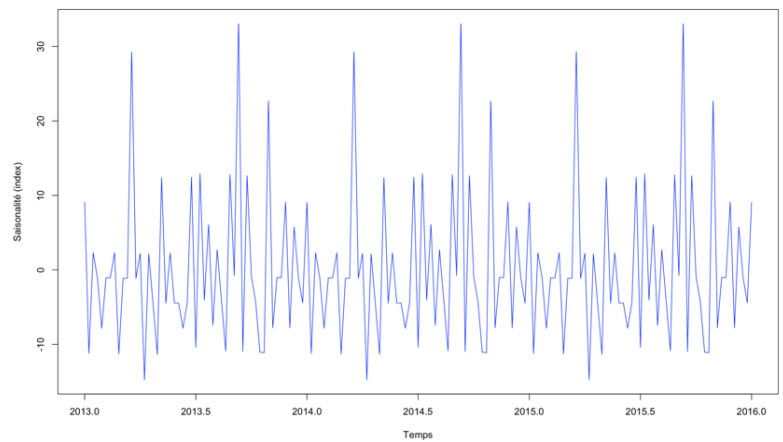
d) San Luis De Cubarral



e) El Calvario



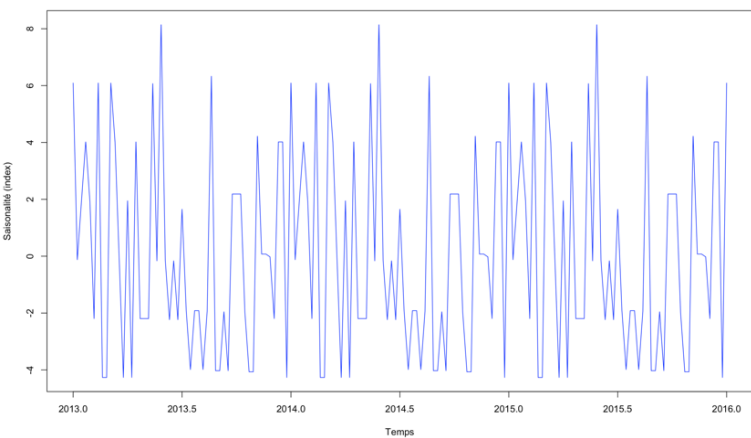
f) El Dorado



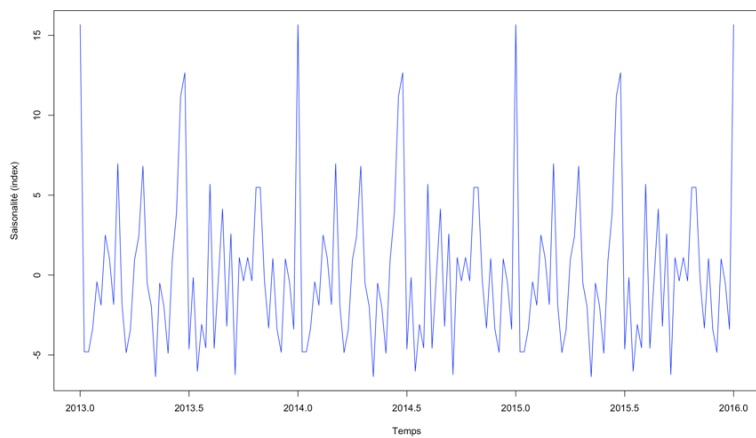
**Figure 9.** Série chronologique présentant la saisonnalité des données de dengue des différentes municipalités du département Méta entre les années 2013 et 2016.



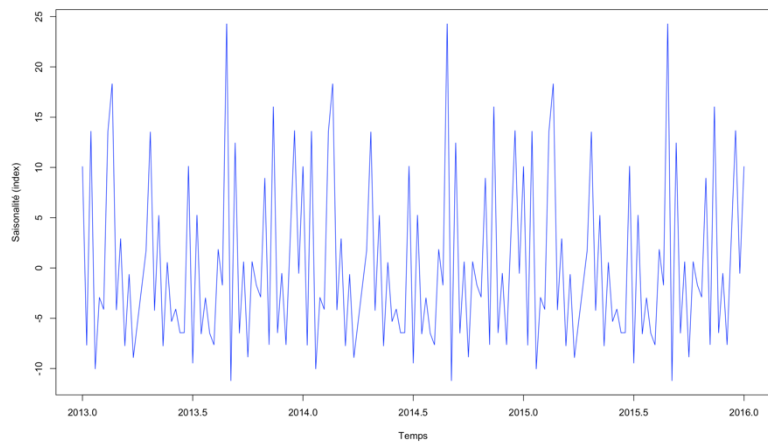
g) Mapiripan



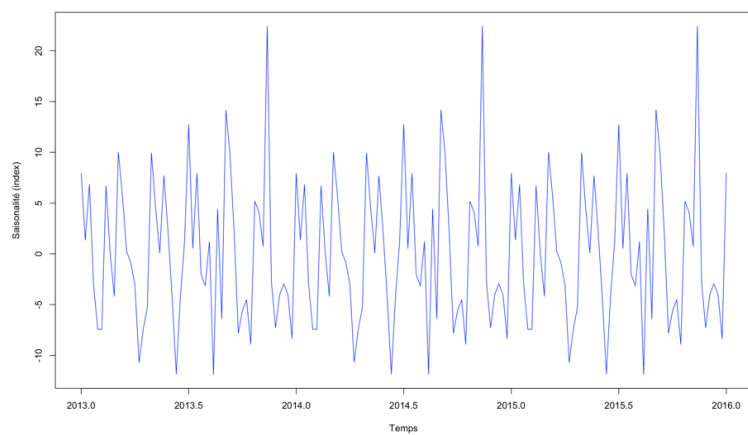
h) La Uribe



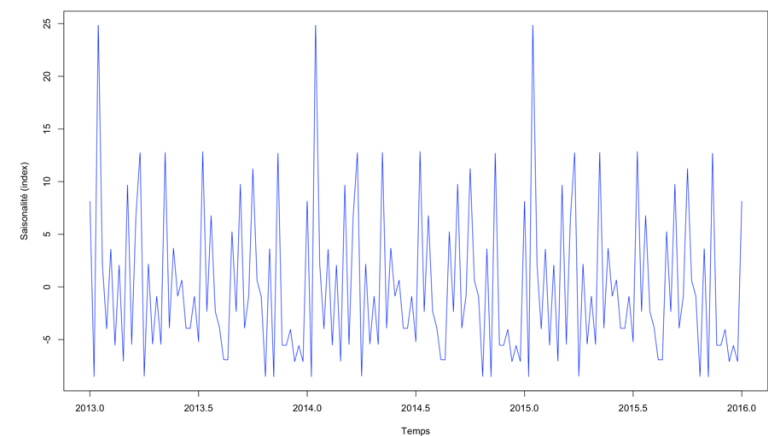
i) Lejanias



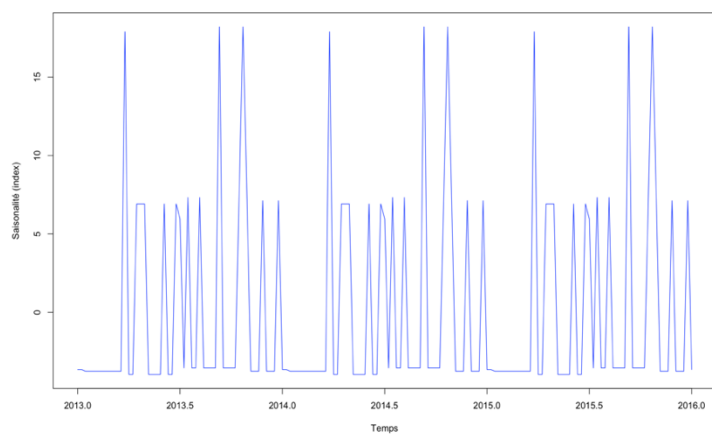
j) San Carlos De Guaroa



k) San Juan De Arama

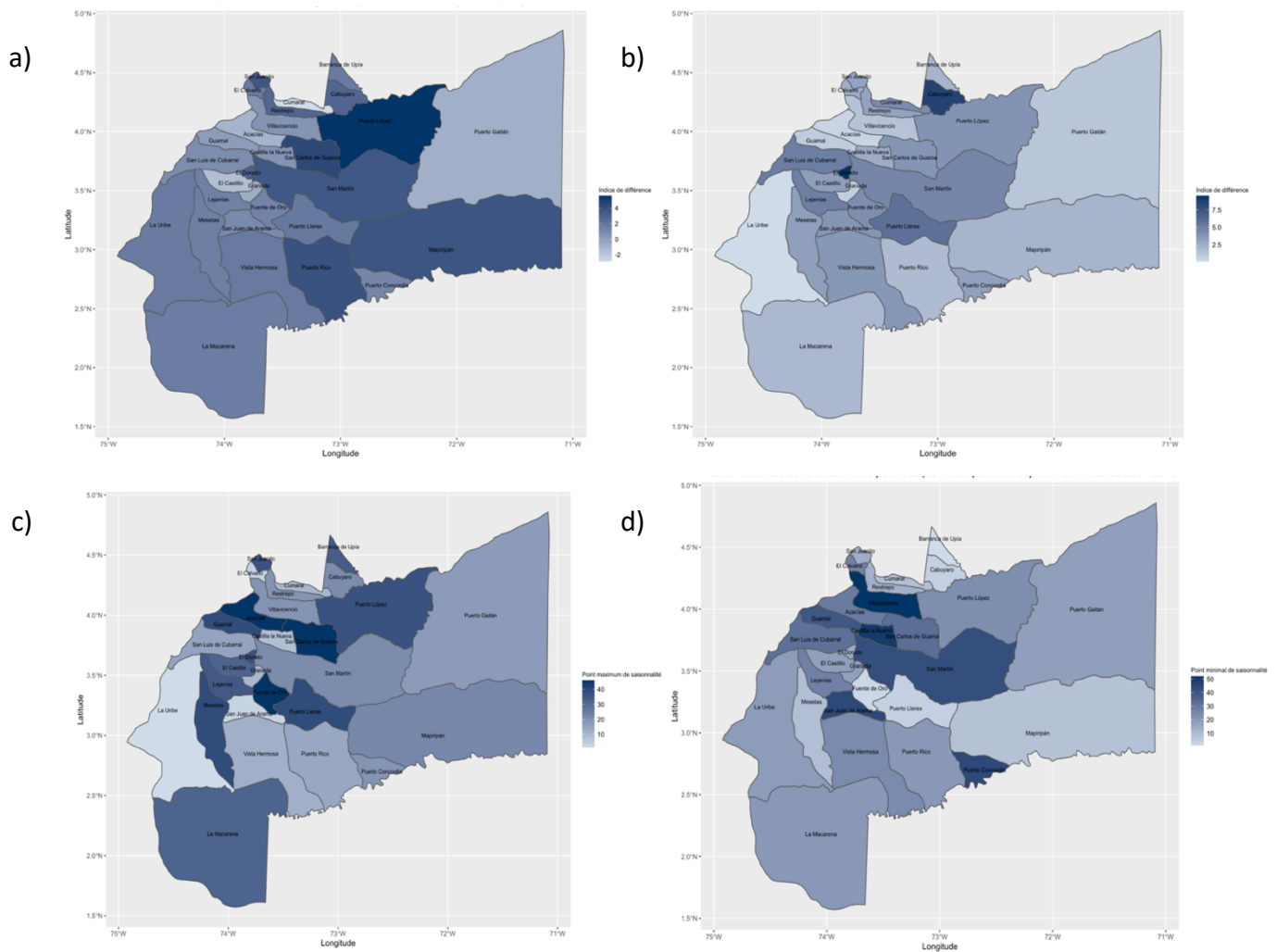


l) San Juanito



**Figure 9.** Séries chronologiques présentant la saisonnalité des données de dengue des différentes municipalités du département Méta entre les années 2013 et 2016 (suite).

Les figures 10a et 10b exposent la distance de la moyenne des points minimaux et maximaux pour chaque municipalité en comparaison avec la valeur médiane du département. Ceci a pour but de situer chacun des sites par rapport à l'ensemble et non pas l'isolation d'une période spécifique dans le temps, d'où la considération des années 2011 à 2019. La figure 10a montre quelques distinctions entre certaines municipalités, notamment Puerto Lopez qui possède la plus grande distance des points minimaux par rapport au reste du département et quelques autres municipalités, dont Cumaral, El Castillo et Puerto Gaitan, qui présentent des différences négatives. Une dépendance spatiale peut être remarquée dans cette figure au niveau centrale et ouest du Méta. Tel est le cas pour la figure 10b, où la partie centrale de département propose des valeurs similaires. Les municipalités démontrant les plus grandes distinctions au niveau des valeurs maximales sont Cabuyaro et El Dorado. Les figures 10c et 10d présentent les semaines où les pics et les points minimaux sont atteints en moyenne dans chaque municipalité. Une hétérogénéité considérable peut être remarquée à travers le département au niveau de la période à valeurs maximales et minimales. Pour les points minimaux, la majorité des municipalités voient cette valeur atteinte en début d'année ou vers la fin soit entre la première et la vingtième semaine ainsi qu'après la 45e semaine. Une grande partie des municipalités voient leurs valeurs maximales parvenir à un sommet entre la 31e et la 46e semaine ainsi qu'entre la 11e et la vingtième semaine.



**Figure 10.** Cartes géographiques illustrant la distance de la moyenne des points (a) minimaux et (b) maximaux par rapport à la médiane du département (2011-2019)\* et le semaine d’atteinte des valeurs (c) minimales et (d) maximales de la saisonnalité (2011-2019)\*\* de chaque municipalité du département de Méta.

\*Le gradient de couleur indique la différence entre la médiane globale et la moyenne des valeurs minimales ou maximales de chaque municipalité. Plus la valeur est élevée, plus la municipalité diffère du reste du département.

\*\*Le gradient de couleur, variant de 0 à 50, indique les semaines dans lesquelles les points minimaux et maximaux de l’incidence de la dengue sont atteints.

En somme, en ce qui concerne la tendance, le début de la période est souvent caractérisé par une croissance avec l’atteinte d’un pic entre 2016 et 2018. La plupart des municipalités ont vu une décroissance d’incidence après 2018. L’effet saisonnier est définitivement et perçu par groupes.

## **4.1.2 Données environnementales**

Cette section vise l'analyse descriptive des prédicteurs environnementaux du département Méta soit les précipitations moyennes, la température ambiante moyenne, la température du point de rosée (TPR) ainsi que la pression au niveau de la mer entre 2010 et 2019.

### **4.1.2.1 Vue d'ensemble des étendues**

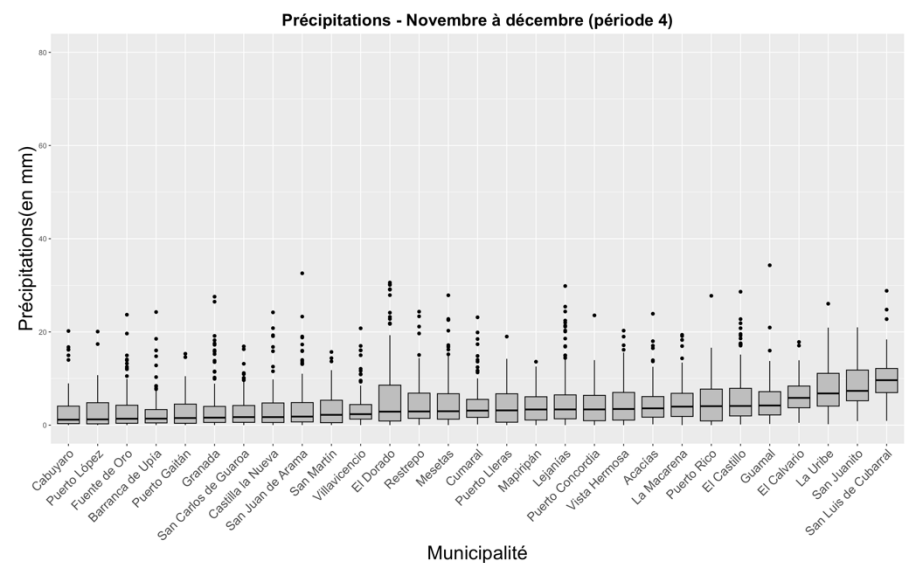
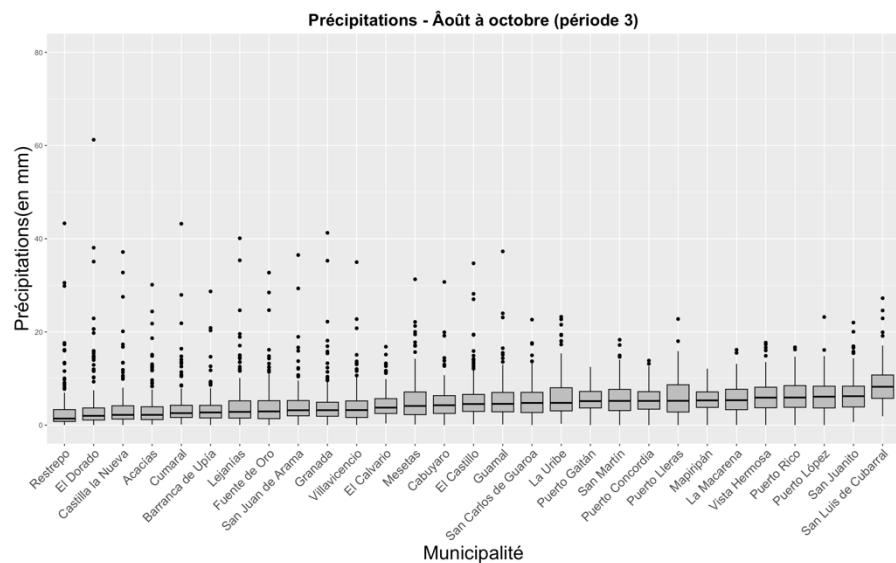
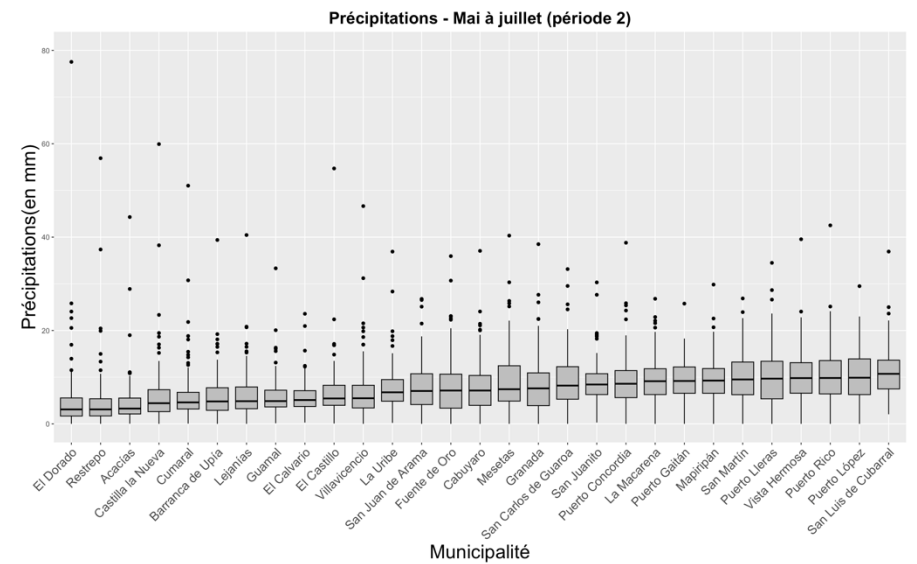
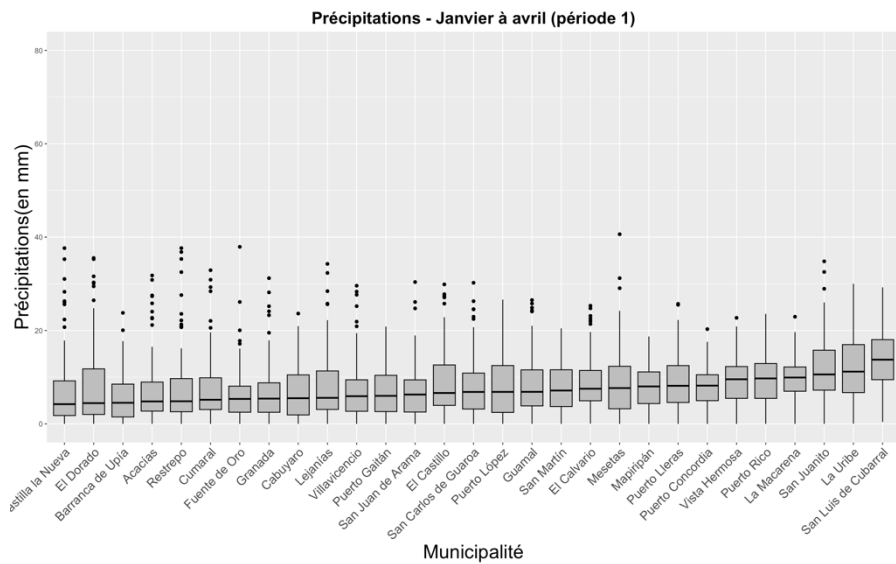
En observant les boîtes à moustache des figures 11 à 14, nous avons une vue d'ensemble de la variation des données de chaque covariable par période. Cette subdivision est essentielle afin d'observer la similarité des données par période toutes années combinées.

Pour les précipitations (figure 11), nous apercevons que les observations hebdomadaires sont distribuées de façon similaire pour les périodes de janvier à avril, de mai à juillet ainsi que de novembre à décembre. La période d'août à octobre présente des étendues réparties sur une plus petite marge de données, indiquant que les données se ressemblent davantage durant ce temps-ci de l'année entre 2010 et 2019. Les périodes de mai à juillet et d'août à octobre exposent les étendues possédant les valeurs les plus élevées. Certaines municipalités se démarquant sont El Calvario, Cabuyaro, Puerto Lleras, Cumaral, Castilla la Nueva dans la période de mai à juillet (période 2), dépassant les 50 mm de précipitations moyennes hebdomadaires.

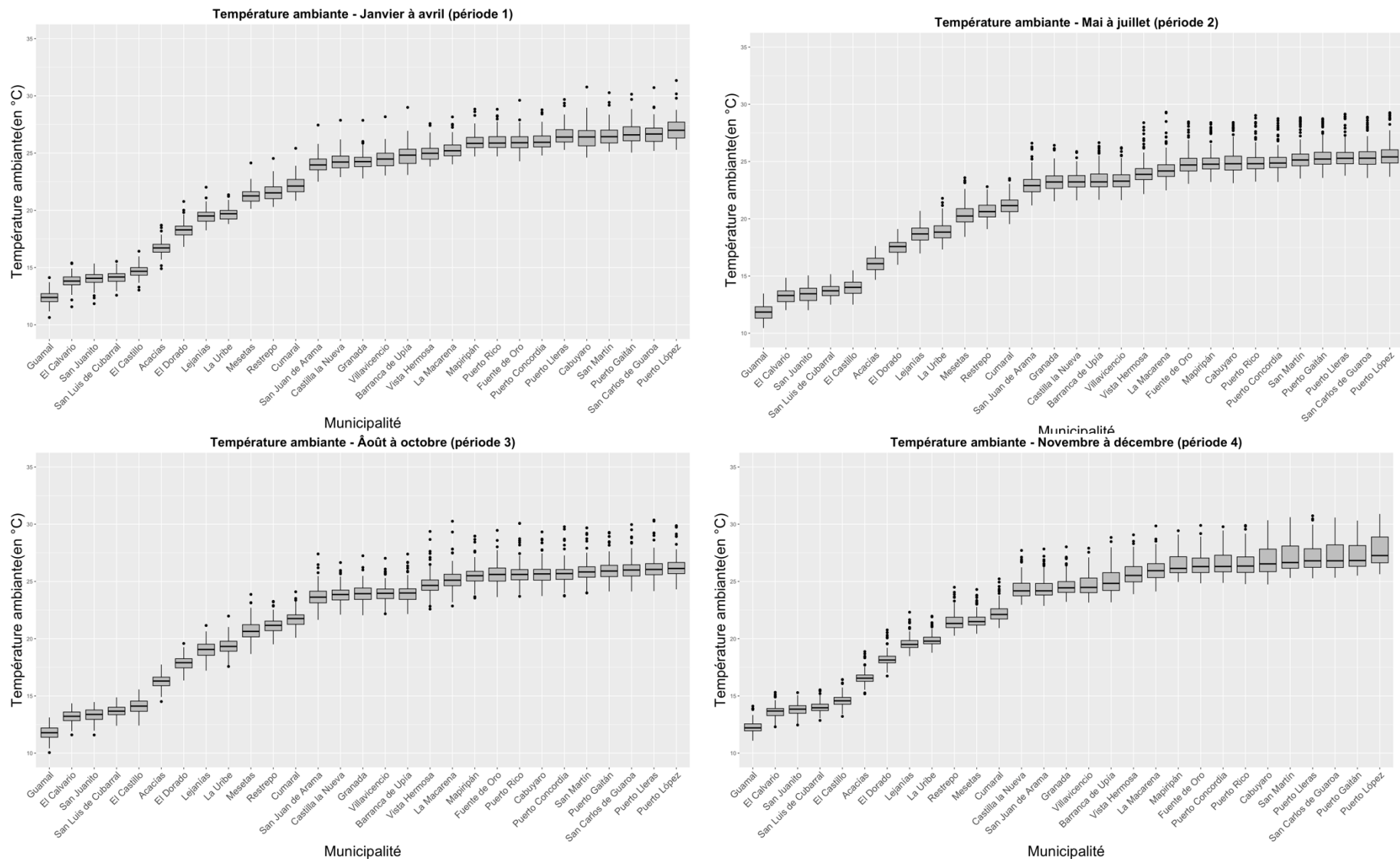
Puis, la figure 12 portant sur la température ambiante moyenne hebdomadaire a permis de conclure que les valeurs hebdomadaires de janvier à avril (période 1) sont davantage distribuées contrairement aux autres périodes. Entre novembre et décembre (période 4), les étendues de la température moyenne hebdomadaire sont grandement plus concentrées que les températures indiquant que les observations varient peu d'année en année pour cette période.

En analysant la figure 13, nous remarquons que les étendues de valeurs de la température du point de rosée (TPR) moyenne hebdomadaire entre mai et juillet et entre août et octobre (périodes 2 et 3) sont plus concentrées que de janvier à avril et novembre à décembre (périodes 1 et 4) où elles s'étendent sur une plus grande marge de valeurs. Beaucoup de municipalités voient leur moyenne maximale atteinte entre mai et juillet (période 2) et leur moyenne minimale atteinte entre janvier et avril (période 1). D'ailleurs, janvier à avril se démarque par des valeurs très élevées comparativement aux valeurs centrales de la distribution. Pour certaines municipalités, les moyennes minimales sont observées entre août et octobre (période 3), dont San Luis de Cubarral et Fuente de Oro.

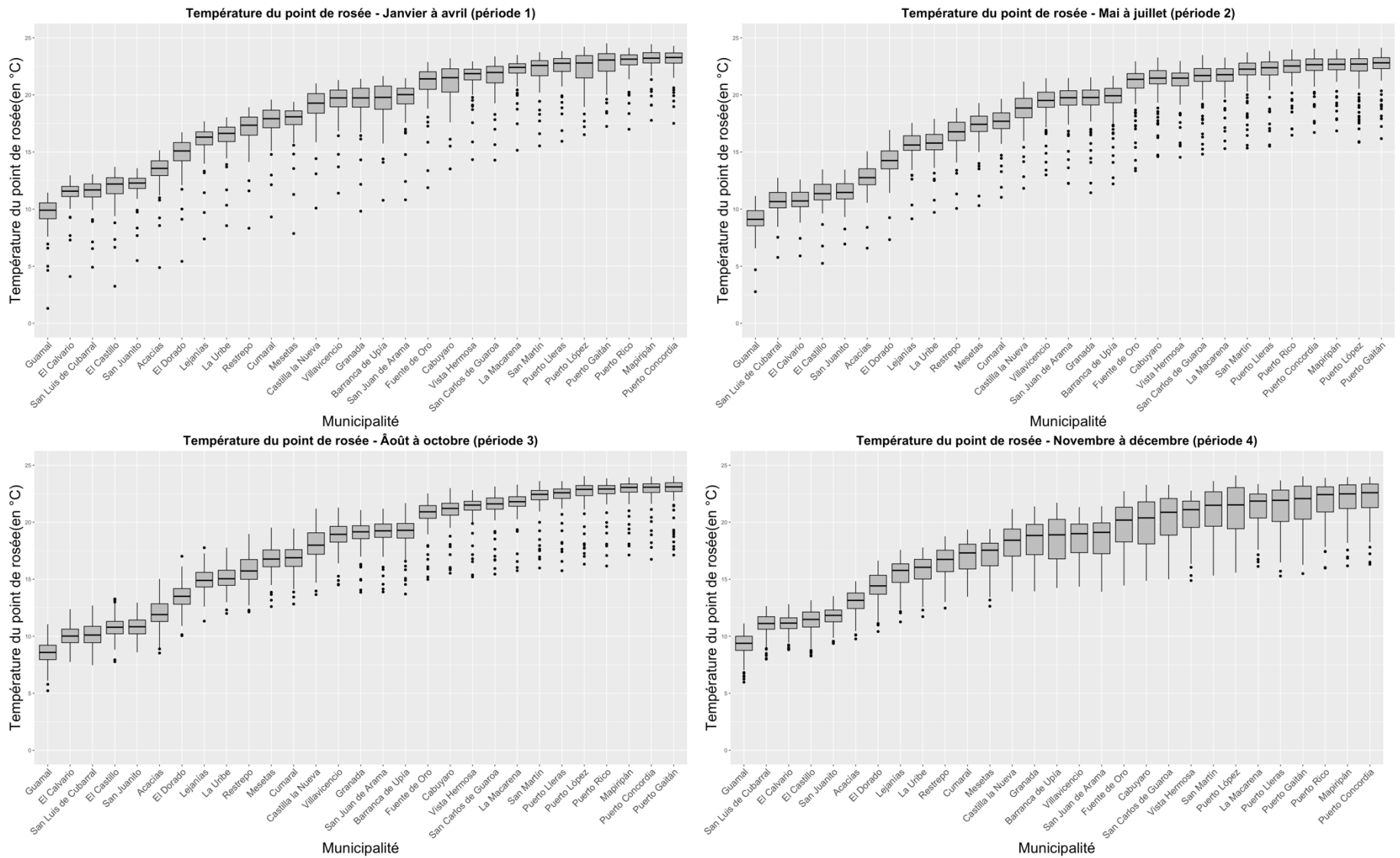
Les étendues de la pression hebdomadaire moyenne au niveau de la mer en question ne semblent pas énormément différer d'une période à l'autre comme le démontre la figure 14. La plupart des municipalités voient leur moyenne maximale atteinte entre mai et juillet (période 2) et leur moyenne minimale atteinte entre novembre et décembre (période 4).



**Figure 11.** Boîtes à moustaches représentant la distribution des précipitations hebdomadaires moyennes pour quatre périodes annuelles des années 2010 à 2019 combinées à travers le département de Méta.

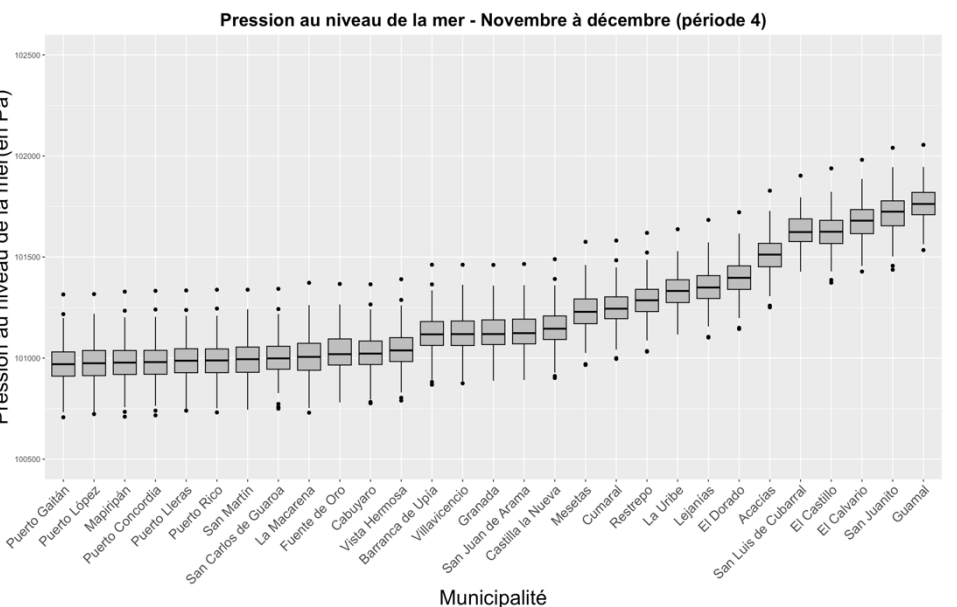
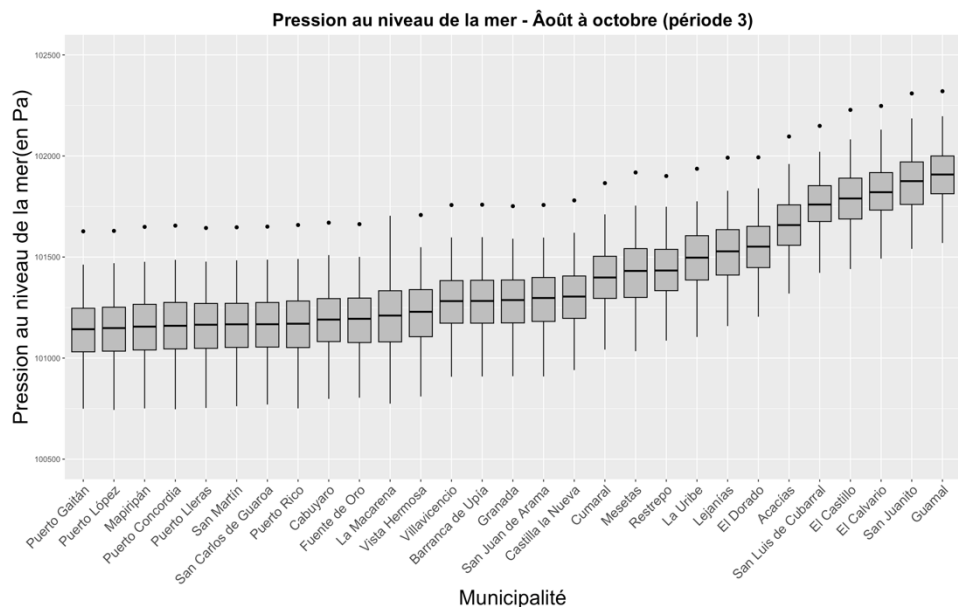
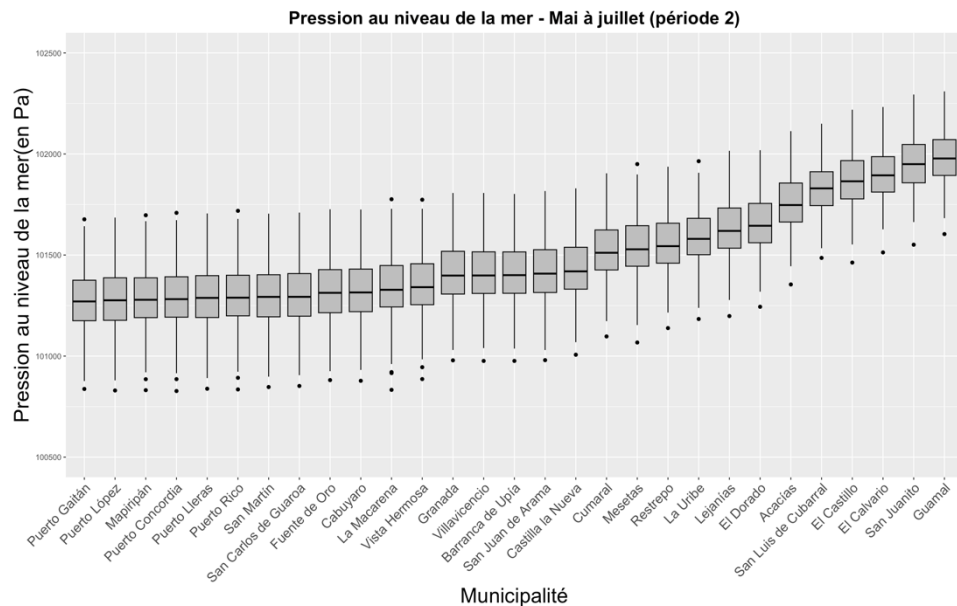
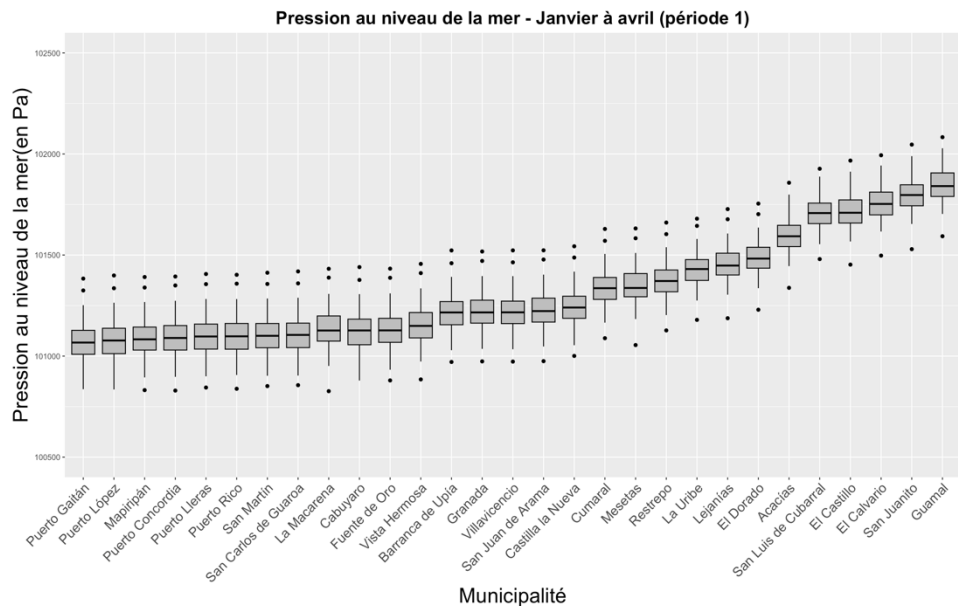


**Figure 12.** Boîtes à moustaches représentant la distribution de la température ambiante hebdomadaire moyenne pour quatre périodes annuelles des années 2010 à 2019 combinées à travers le département de Méta.



**Figure 13.** Boîtes à moustaches représentant la distribution de la température du point de rosée hebdomadaire moyenne pour quatre périodes annuelles des années 2010 à 2019 combinées à travers le département de Méta.





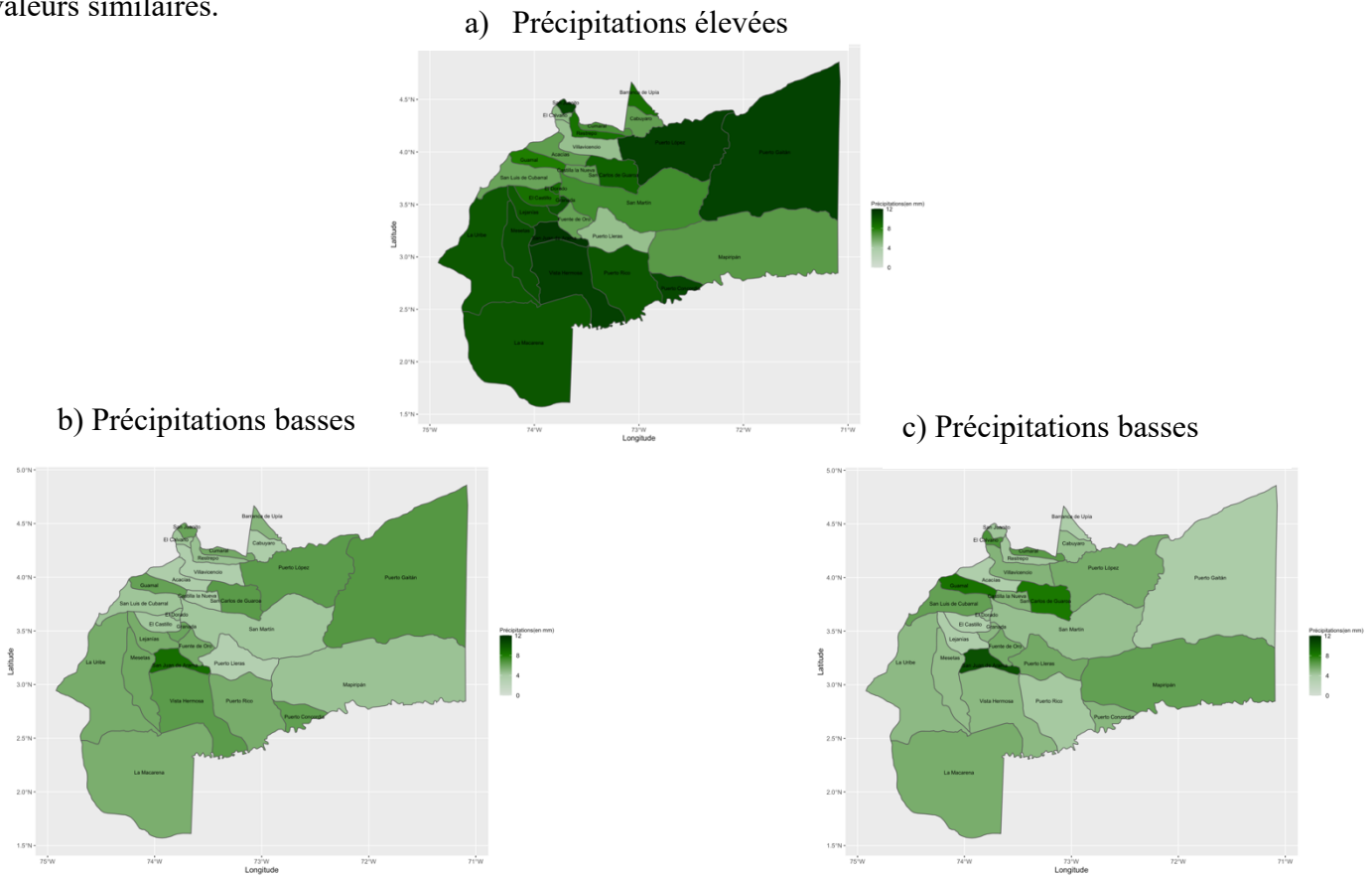
**Figure 14.** Boîtes à moustaches représentant la distribution de la pression moyenne hebdomadaire au niveau de la mer pour quatre périodes annuelles des années 2010 à 2019 combinées à travers le département de Méta.

#### 4.1.2.2 Visualisation des périodes annuelles élevées et basses par covariable

La partie suivante a pour but la visualisation géographique des périodes de valeurs élevées et basses de chaque covariable basées sur les périodes mentionnées à la section 3.4.1. Les valeurs affichées consistent de moyennes de valeurs hebdomadaires moyennes pour le laps de temps défini.

##### 4.1.2.2.1 Précipitations moyennes hebdomadaires

Les précipitations voient pour la majorité des municipalités l'atteinte de leur sommet entre mai et juillet (figure 15a). Nous voyons la différence importante entre cette période et celles d'août à octobre ou de novembre à décembre (figures 15b et 15c). Ceci s'applique notamment aux municipalités de Puerto Gaitan, La Macarena et La Uribe. San Juan de Arama semble posséder de hautes précipitations à plusieurs moments de l'année. De plus, Puerto Lleras et Villavicencio présentent de basses valeurs comparativement au reste du département. La période de mai à juillet semble démontrer une dépendance géographique dans la région nord-est et sud-ouest, avec des valeurs similaires.

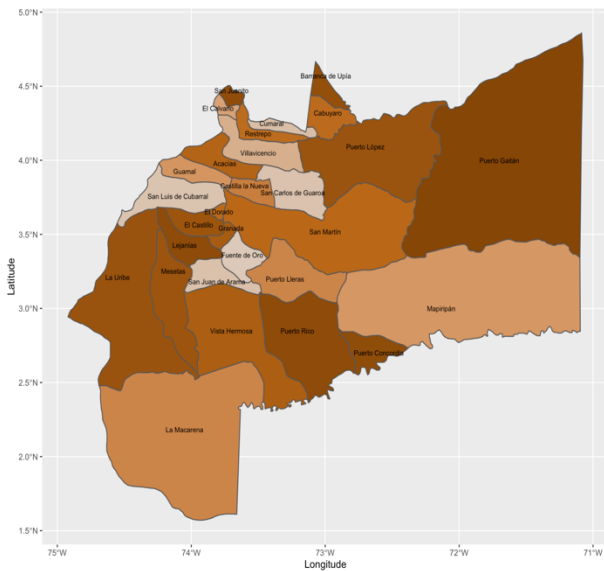


**Figure 15.** Cartes géographiques illustrant la période comptant les précipitations (a) les plus élevées, période de mai à juillet, et (b et c) les plus basses, période d'août à octobre ou novembre à décembre, basées sur des valeurs moyennes à travers le département de Méta de 2010 à 2019.

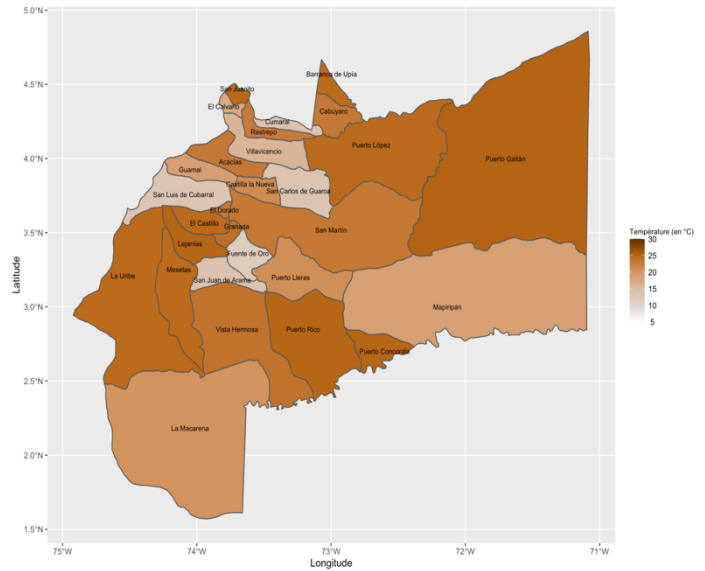
#### 4.1.2.2.2 Température ambiante moyenne hebdomadaire

La température ambiante moyenne hebdomadaire a légèrement varié pour certaines municipalités du département de Méta entre la période élevée de janvier à avril (Figure 16a) et celle qui est basse (Figure 16b), soit de mai à juillet. La municipalité de Puerto Gaitan et Puerto Rico servent d'exemples. Encore une fois, Fuente de Oro, San Carlos de Guaroa, San Luis de Cubarral et San Juan de Arama possèdent des valeurs inférieures au reste du département. Une dépendance géographique est aussi remarquée dans la région nord-est et sud-ouest du département dans la période de mai à juillet avec des valeurs similaires.

(a) Températures élevées



b) Températures basses

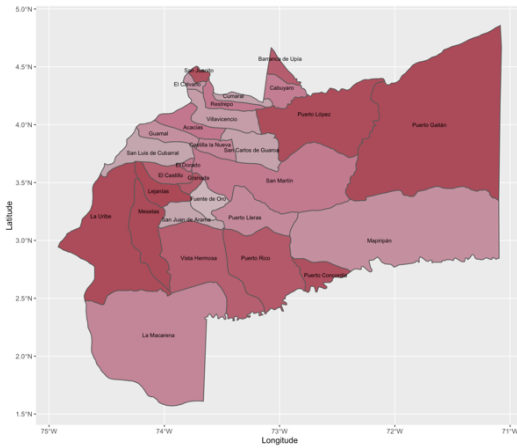


**Figure 16.** Cartes géographiques illustrant la période comptant les températures ambiantes (a) les plus élevées, période de janvier à avril, et (b) les plus basses, période de mai à juillet, basées sur des valeurs moyennes à travers le département de Méta de 2010 à 2019.

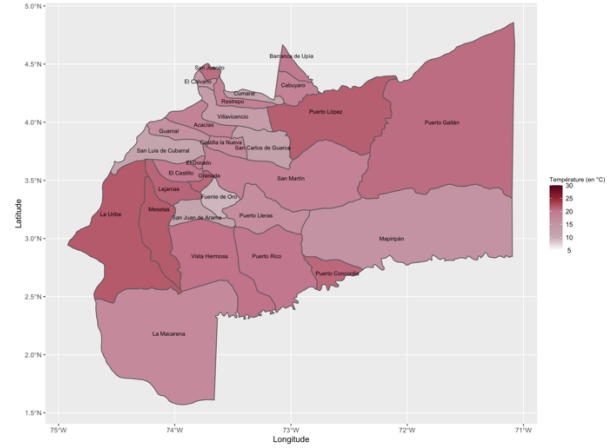
#### 4.1.2.2.3 Température du point de rosée moyenne hebdomadaire

La température moyenne du point de rosée ne varie pas énormément selon les périodes de l'année. Les mêmes municipalités se distinguent quant aux hautes (figure 17a) et basses valeurs (figure 17b).

(a) Températures élevées



b) Températures basses

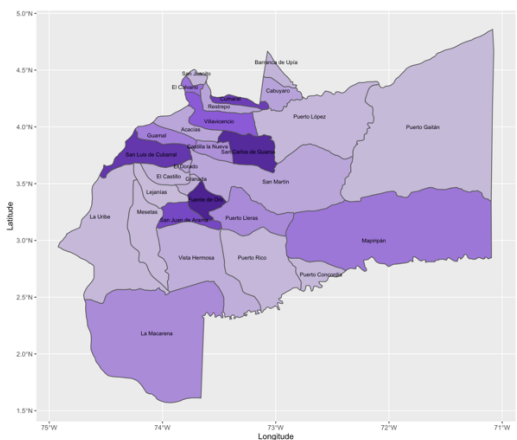


**Figure 17.** Cartes géographiques illustrant la période comptant les températures du point de rosée (a) les plus élevées, période de mai à juillet, et (b) les plus basses, période de janvier à avril, basées sur des valeurs moyennes à travers le département de Méta de 2010 à 2019.

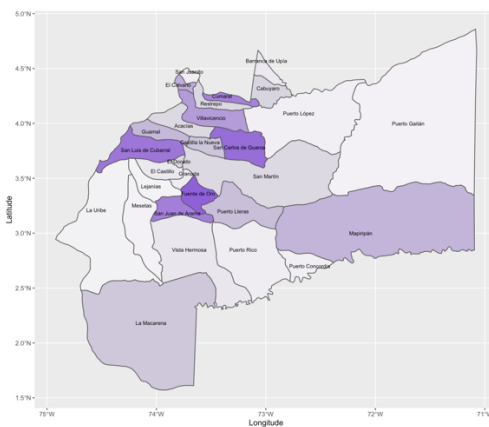
#### 4.1.2.2.4 Pression hebdomadaire moyenne au niveau de la mer

Les figures 18a et 18b démontrent respectivement la période de valeurs élevées et basses de la pression hebdomadaire moyenne. Les municipalités ayant démontrées des températures basses précédemment démontrent ici des pressions au niveau de la mer élevées par rapport au reste du département. Celles-ci consistent de Fuente de Oro, San Carlos de Guaroa, San Luis de Cubarral et San Juan de Arama. On voit pour le reste de Méta que durant la période de novembre à décembre, une grande partie des municipalités possèdent des valeurs frôlant les 100 900 Pa. Pour la période possédant des valeurs élevées, la pression se situe entre 101200 et 101500 Pa. Aucune dépendance spatiale ne semble se démarquer.

a) Pressions élevées



b) Pressions basses



**Figure 18.** Cartes géographiques illustrant la période comptant les pressions au niveau de la mer (a) les plus élevées, période de mai à juillet, et (b) les plus basses, période de novembre à décembre, basées sur des valeurs moyennes à travers le département de Méta de 2010 à 2019.

**Tableau 4.** Sommaire des périodes où les valeurs faibles et les valeurs élevées sont atteintes pour les variables prédictives

Variables	Périodes à valeurs faibles				Périodes à valeurs élevées			
	Janvier- Avril	Mai-Juillet	Aout- Octobre	Novembre- Décembre	Janvier- Avril	Mai-Juillet	Aout- Octobre	Novembre- Décembre
Précipitation moyenne hebdomadaire			<b>X</b>	<b>X</b>		<b>X</b>		
Température ambiante hebdomadaire moyenne de l'air		<b>X</b>			<b>X</b>			
Température moyenne hebdomadaire du point de rosée (TPR)	<b>X</b>					<b>X</b>		
Pression hebdomadaire moyenne au niveau de la mer				<b>X</b>		<b>X</b>		

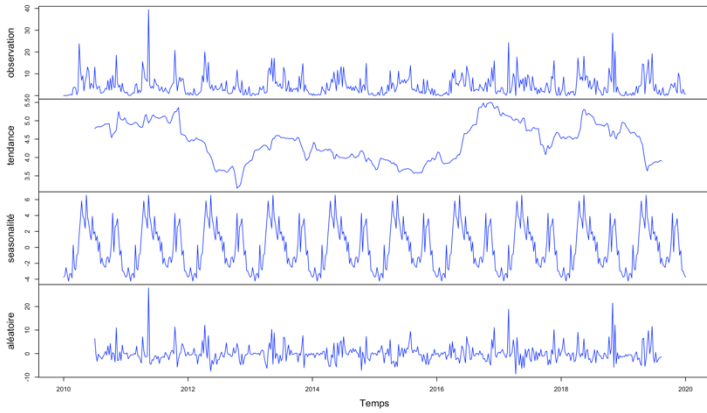
### **4.1.2.3 Séries chronologiques**

#### **4.1.2.3.1 Précipitations moyennes hebdomadaires**

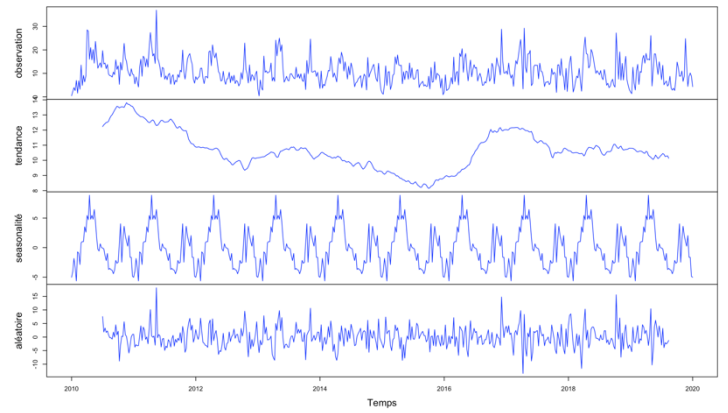
##### **4.1.2.3.1.1 Tendances**

En regardant les séries chronologiques des précipitations de près, on remarque différentes tendances à travers le département. Ici, nous avons pris en compte l'ensemble de la période pour une compréhension globale des tendances à travers le temps. À Barranca de Upia (figure 19a), par exemple, les précipitations présentent une tendance assez constante de 2010 jusqu'à la fin de l'année 2011 où une décroissance se laisse constater. Celle-ci persiste jusqu'au point minimal en fin de 2012 pour continuer avec une croissance à long terme jusqu'à l'atteinte du pic de la tendance en fin 2016. L'enchaînement se caractérise d'une décroissance interrompue par quelques rehausses mineures. Puis, San Luis de Cubarral (figure 19b) commence la période avec une croissance se rendant au sommet en fin de 2010, suivi d'une décroissance des précipitations entre 2011 et 2016. Entre la fin de 2015 et la fin de 2016, une hausse moyenne est observée. La suite est une constance de la tendance au niveau moyen jusqu'à la fin de la période d'intérêt. Fuente de Oro (figure 19c) voit 3 périodes de croissance dans l'intervalle d'intérêt : entre la fin de 2012 et la fin de 2013 ; entre le début et la fin de 2016 ; entre la fin de 2017 et la fin de 2018. Au contraire, 4 périodes de décroissances se font remarquer : du début de la période d'étude à la fin de 2012 ; de 2014 au début de 2016 ; de la fin de 2016 à la fin de 2017 ; de la fin de 2018 à la fin de la période d'intérêt. Mapiripan (figure 19d) débute avec une constance de la pente jusqu'à la fin de l'année 2016 où l'on observe une chute majeure de la tendance des précipitations jusqu'à l'atteinte du point minimal à la fin de l'année 2017. Cet événement est suivi d'une hausse jusqu'à la fin de la période. Finalement, La Macarena (figure 19e) commence avec une croissance de la pente jusqu'au début de 2013. Celle-ci est interrompue par une chute au début de 2012. Toutefois, à partir de 2013, la tendance décroît jusqu'au début de 2016 où une autre période de croissance surgit, poursuivie d'une décroissance jusqu'à la fin de 2017 ainsi qu'une croissance jusqu'à la fin de la période d'intérêt.

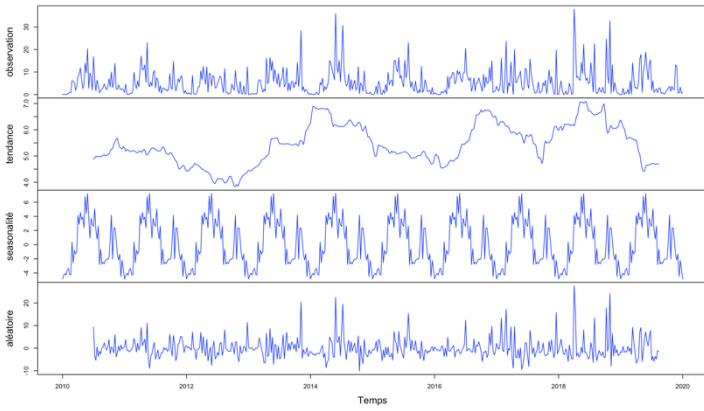
(a) Barranca de Upia



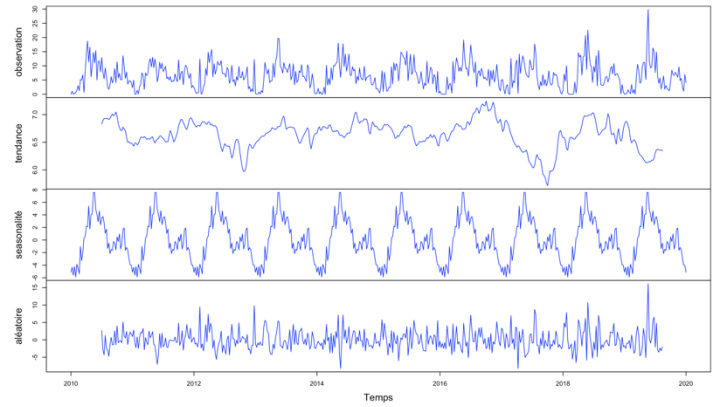
(b) San Luis de Cubarral



(c) Fuente de Oro



(d) Mapiripan



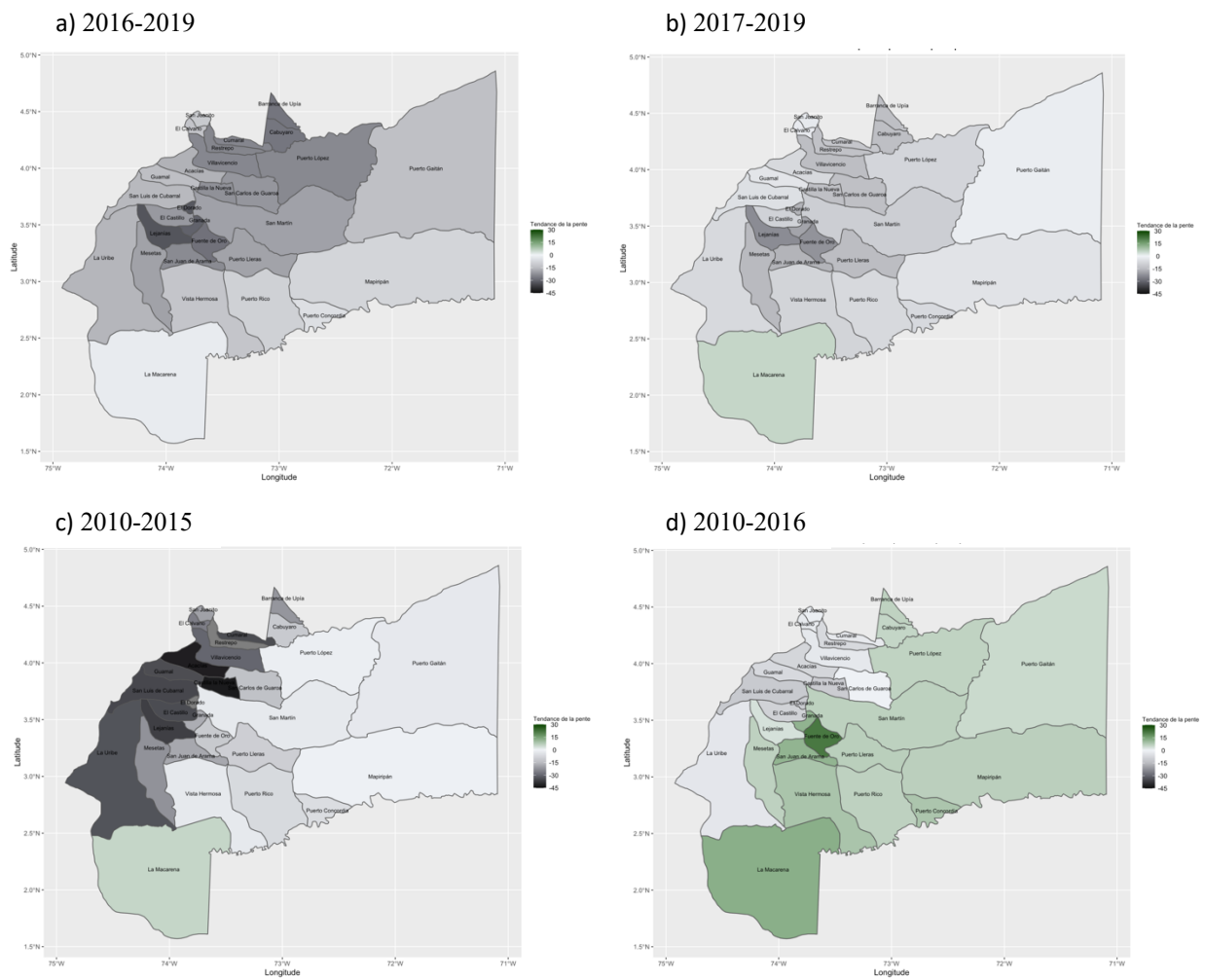
(e) La Macarena



**Figure 19.** Décomposition de la série temporelle additive de la municipalité de (a) Barranca De Upia, (b) San Luis de Cubarral, (c) Fuente de Oro, (d) Mapiripan, (e) La Macarena représentant les précipitations moyennes totales hebdomadaires (en mm) à travers les années à l'étude (2010-2019).

Puis, la figure 20 permet de mettre de l'avant la représentation spatiale de la pente de l'évolution des précipitations moyennes dans les marges suivantes : 2016-2019 (figure 20a), 2017-2019 (figure 20b), 2010-2015 (figure 20c) et 2010-2016 (figure 20d) chaque municipalité du département de Méta. À noter que ces marges ont été compartimentées de sorte à couvrir le début et la fin de la période d'intérêt. Les pentes positives démontrent une croissance, tandis que les pentes négatives indiquent une décroissance de la covariable de précipitations. Une pente nulle n'indique aucun changement dans la période d'intérêt. Nous observons une tendance à la hausse entre 2016 et 2019 (figure 20a) des précipitations et que l'ensemble possédait une pente nulle ou négative. La région nord-ouest est celle comprenant l'entièreté des municipalités reflétant des pentes négatives quant aux précipitations. Lorsque l'année 2016 est retirée de l'équation (figure 20b), beaucoup plus de municipalités reflètent des pentes négatives à l'exception de La Macarena, qui voit une augmentation des précipitations. En s'accroissant sur la première partie de la période d'intérêt (figure 20c), soit de 2010 à 2015, nous voyons que maintes municipalités à l'ouest du département ont une pente de la tendance négative. L'est du département tend vers une tendance nulle. Encore une fois, La Macarena traduit une pente positive qui d'ailleurs augmente avec l'ajout de l'année 2016 (figure 20d). D'autres municipalités présentent des pentes positives dans la marge de 2010 à 2016. Contrairement à celles avec des pentes négatives localisées au nord-ouest du département, ces municipalités ne sont pas adjacentes géographiquement.





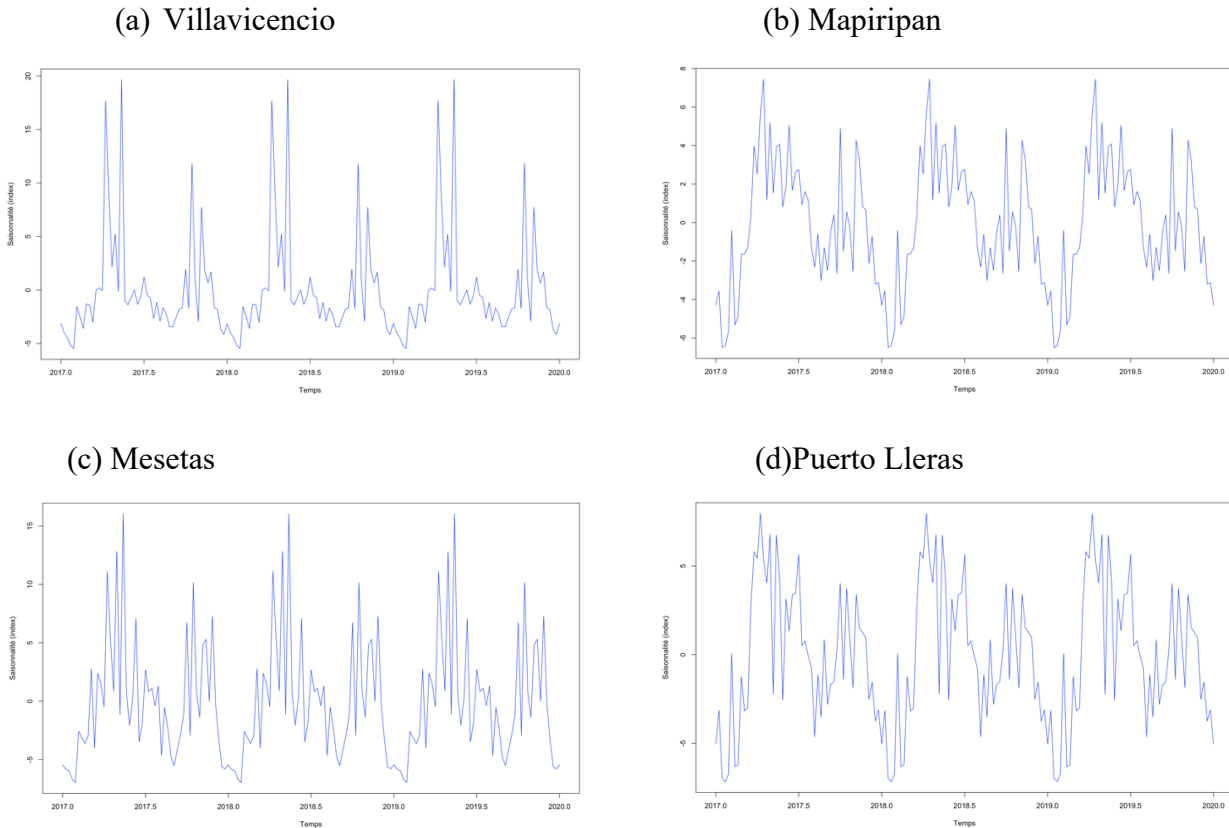
**Figure 20.** Cartes géographiques illustrant la tendance de la pente des précipitations moyennes hebdomadaires entre (a) 2016-2019, (b) 2017-2019, (c) 2010-2015 et (d) 2010-2016 de chaque municipalité du département de Méta.

\*Le gradient de couleur indique la pente des valeurs des précipitations moyennes hebdomadaires de chaque municipalité. Les pentes positives, illustrées par des tons de bleus, démontrent une croissance, tandis que les pentes négatives, illustrées par des tons de gris, indiquent une décroissance.

#### 4.1.2.3.1.2 Saisonnalité

La saisonnalité a été regroupée selon quatre types de résultats dans le département avec une focalisation sur les années 2017 et 2020 pour mieux visualiser les fluctuations condensées. D'abord, certaines municipalités, telles que Villavicencio (figure 21a), proposent des données de précipitations moyennes hebdomadaires comprises dans une marge plutôt limitée avec des pics irréguliers entre mars et juin ainsi qu'entre septembre et décembre. Puis, Mapiripan (figure 21b) présente une croissance depuis le début d'année jusqu'à l'atteinte d'un point maximal entre mars et juin. Ceci est suivi d'une décroissance avec une rehausse vers la fin de l'année pour ensuite chuter. La saisonnalité à Mesetas (figure 21c) et Puerto Lleras (figure 21d) est assez similaire à

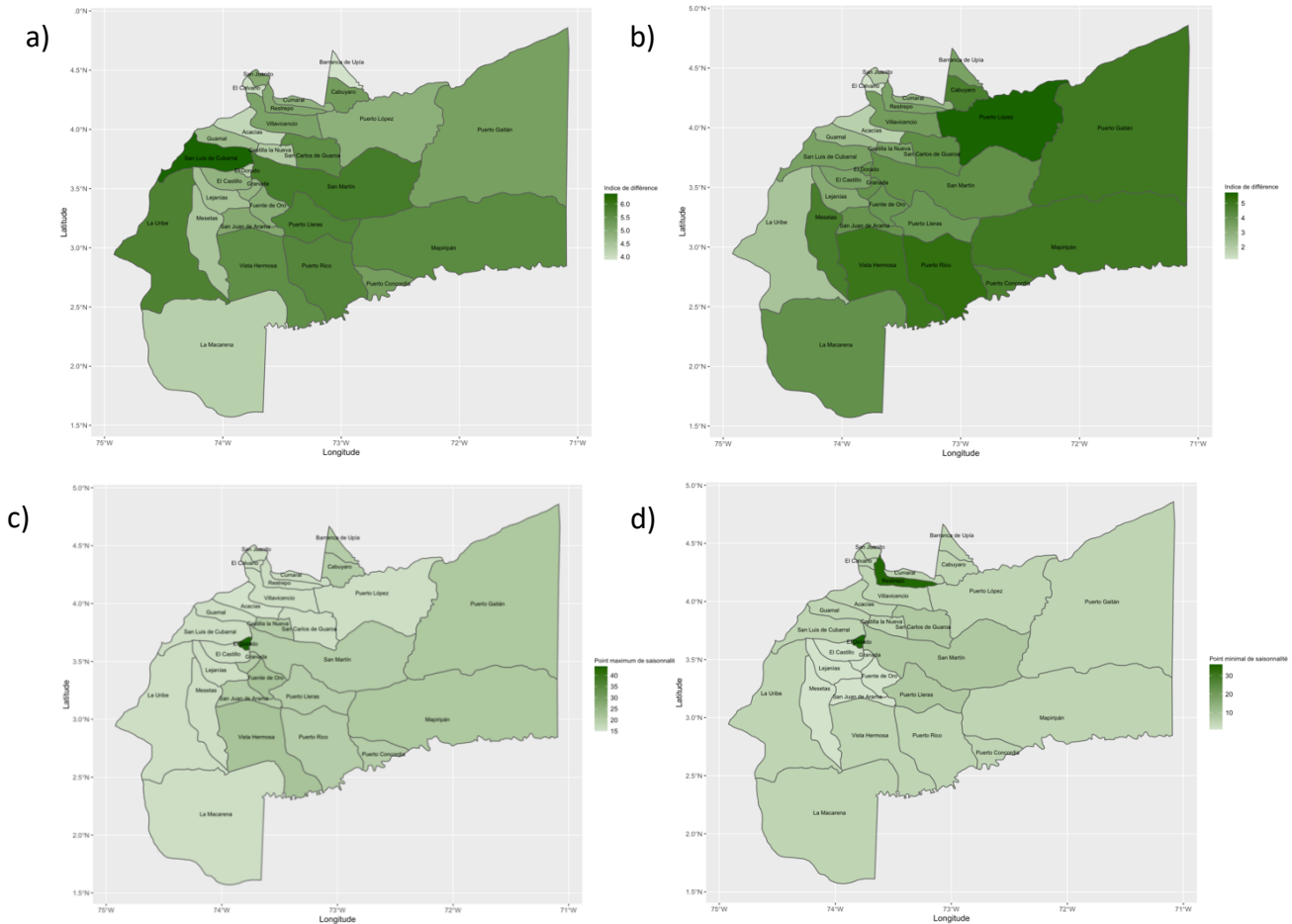
celle de Villavicencio et Mapiripan avec des marges de valeurs plus étendues et des sommets plus prononcés. Le point de l'année ou la saisonnalité de cette covariable pour l'ensemble du département est à son point minimal est entre janvier et février.



**Figure 21.** Représentation de la saisonnalité entre 2017 et 2019 pour la covariable de précipitations hebdomadaires moyennes dans les municipalités de (a) Villavicencio, (b) Mapiripan, (c) Mesetas et (d) Puerto Lleras du département de Méta.

Les figures 22 exposent la distance de la moyenne des points minimaux et maximaux pour chaque municipalité en comparaison avec la valeur médiane du département. Ceci a pour but de situer chacun des sites par rapport à l'ensemble et non pas l'isolation d'une période spécifique dans le temps, d'où la considération des années 2010 à 2019. En comparant les moyennes de chaque municipalité avec la médiane de l'entièreté du département Méta, certaines se sont démarquées quant à cette distance. Pour les points maximaux illustrés à la figure 22a, San Luis de Cubarral et San Martin présentent les différences les plus élevées. Barranca de Upia est la municipalité avec la plus similaire à la médiane des valeurs maximales. Pour ce qui en est des valeurs minimales (figure 22b), Puerto Lopez est celle avec la plus grande différence de la médiane tandis qu'El

Calvario ou Acacias possèdent les plus petites valeurs. Les visualisations à la figure 22c et la figure 22d permettent de voir que la grande majorité des municipalités atteignent leur valeur minimale et maximale en début d'année, avec l'exception d'El Dorado (point maximum à la 44<sup>e</sup> semaine, point minimum à la 36<sup>e</sup> semaine) et Restrepo (point minimal à la 35<sup>e</sup> semaine).



**Figure 22.** Cartes géographiques illustrant la distance de la moyenne des points (a) maximaux et (b) minimaux par rapport à la médiane du département (2010-2019)\* et la semaine d'atteinte des valeurs (c) maximales et (d) minimales de la saisonnalité (2010-2019)\*\* pour la saisonnalité de la covariable de précipitations de chaque municipalité du département de Méta.

\*Le gradient de couleur indique la différence entre la médiane globale et la moyenne des valeurs minimales ou maximales de chaque municipalité. Plus la valeur est élevée, plus la municipalité diffère du reste du département.

\*\*Le gradient de couleur indique les semaines où les points minimaux et maximaux des précipitations sont atteints.

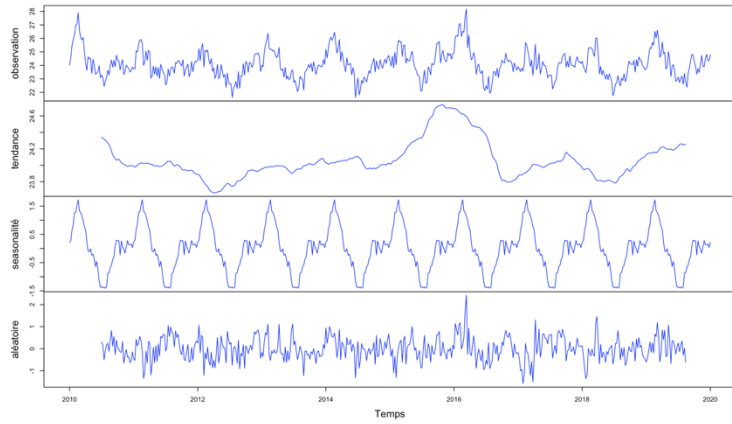
En somme, les tendances sont variables d'une municipalité à l'autre pour les précipitations moyennes hebdomadaires. En prenant compte du début de la période (2010-2015), on témoigne d'une importante différence entre les municipalités situées au Nord-Ouest de Méta qui semble avoir des tendances décroissantes des incidences et le reste du département qui tend plutôt vers une valeur nulle. La fin de la période (2016-2019) se caractérise en majorité d'une tendance décroissante ou nulle.

### **4.1.2.3.2 Température ambiante moyenne hebdomadaire**

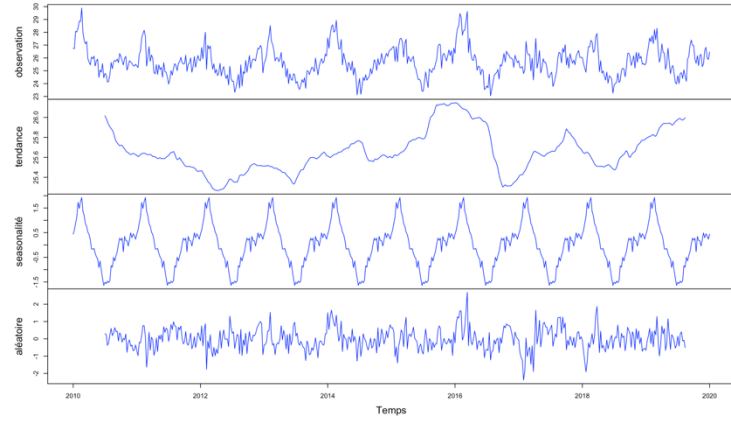
#### **4.1.2.3.2.1 Tendances**

La figure 23 présente des similarités dans l'ensemble tel qu'un début avec des valeurs décroissantes jusqu'à l'atteinte de la valeur minimale en 2012, suivie d'une hausse jusqu'au pic puis d'une chute pour terminer. La période d'intérêt se termine par une croissance modérée de la tendance. Hormis l'ampleur variable des courbes croissantes et décroissantes ainsi que des pics, les tendances de la température ambiante moyenne hebdomadaire de Villavicencio, Fuente de Oro, San Juanito et Vista Hermosa se ressemblent énormément entre 2010 et 2019.

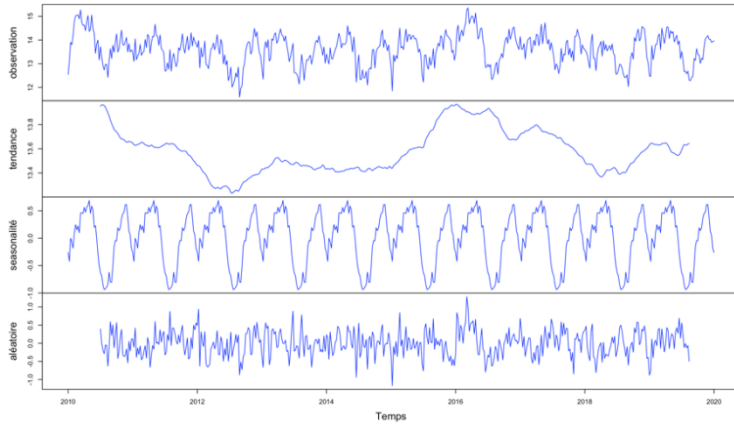
(a) Villavicencio



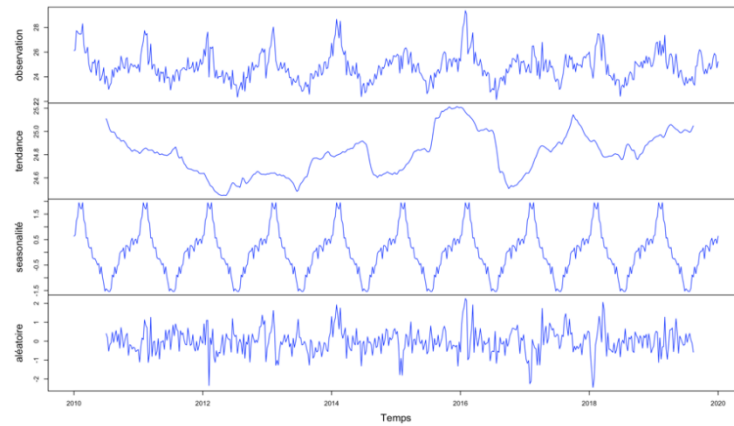
(b) Fuente de Oro



(c) San Juanito



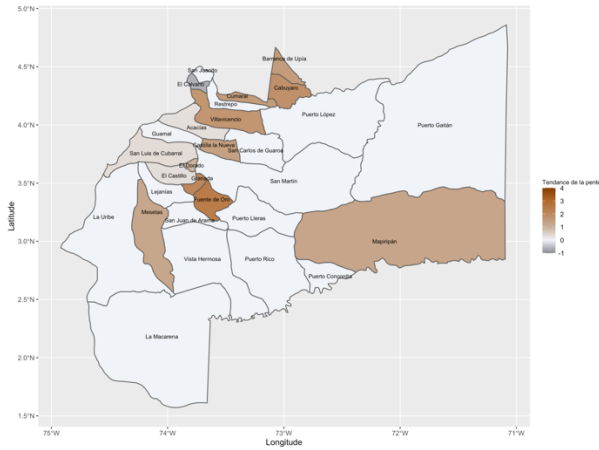
(d) Vistahermosa



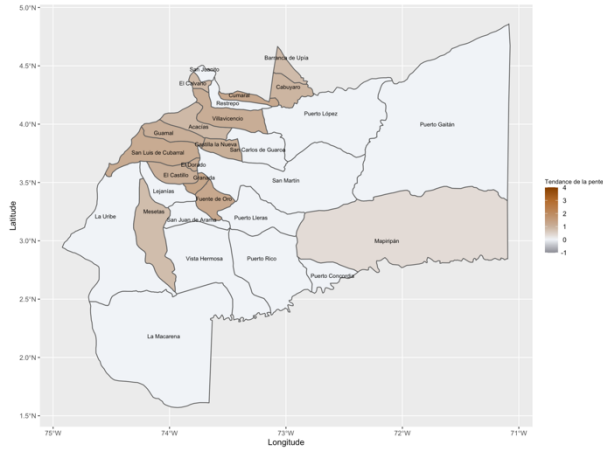
**Figure 23.** Décomposition de la série temporelle additive de la municipalité de (a) Villavicencio, (b) Fuente de Oro, (c) San Juanito et (d) Vistahermosa représentant les températures ambiantes moyennes hebdomadaires (en °C) à travers les années à l'étude (2010-2019).

La pente de la tendance pour la température ambiante en est un autre qui varie moindrement, parfois aucunement. En effet, plus de la moitié des municipalités ne voient pas de fluctuations quant à cette covariable, illustrées en blanc dans les cartes géographiques à la figure 24. Entre 2016 et 2019 (figure 24a), on observe une augmentation de la pente pour quelques municipalités dans la région nord-ouest du département ainsi que Mapiripan à l'est. El Calvario se démarque comme étant l'unique municipalité voyant une décroissance de la tendance durant cette période-ci. Puis, en tenant compte des années 2017 à 2019 uniquement (figure 24b), aucune municipalité ne présente des tendances négatives de la température ambiante. D'autres municipalités à tendance positive se rajoutent sur cette période, dont Guamal. San Luis de Cubarral et El Castillo servent d'exemples de municipalités où la pente de la tendance accroît lorsque l'année 2016 n'est plus prise en considération, laissant croire que celle-ci atténuait cette valeur. Pour la marge de 2010 à 2015 (figure 24c), San Luis de Cubarral est ici la seule municipalité montrant une décroissance de la pente de la tendance. Encore une fois, le nord-ouest du département ainsi que Mapiripan à l'est démontrent des valeurs positives. Castilla La Nueva est la municipalité avec la pente de la température ambiante la plus élevée du département. Finalement, pour une marge de 2010 à 2016 (figure 24d), la majorité des municipalités voient leur tendance altérer vers la borne négative avec Mesetas et Fuente de Oro ayant les valeurs les plus minimales, donc avec le plus de décroissance quant à la covariable de température ambiante. Ceci supporte l'observation mentionnée ci-haut vis-à-vis de l'effet négatif qu'a l'année 2016. D'ailleurs, Mapiripan passe d'une tendance moyennement élevée entre 2010 et 2015 à nulle entre 2010 et 2016.

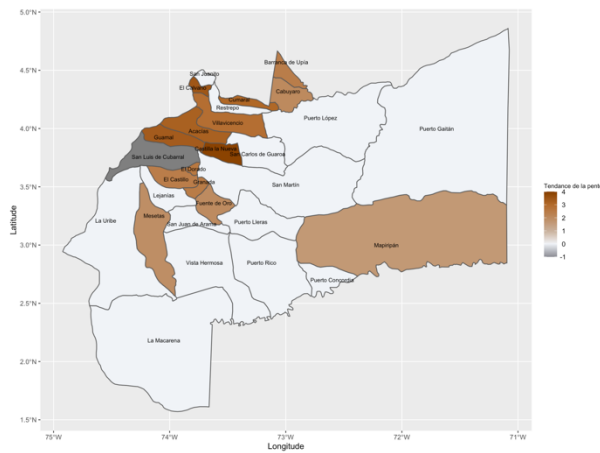
a) 2016-2019



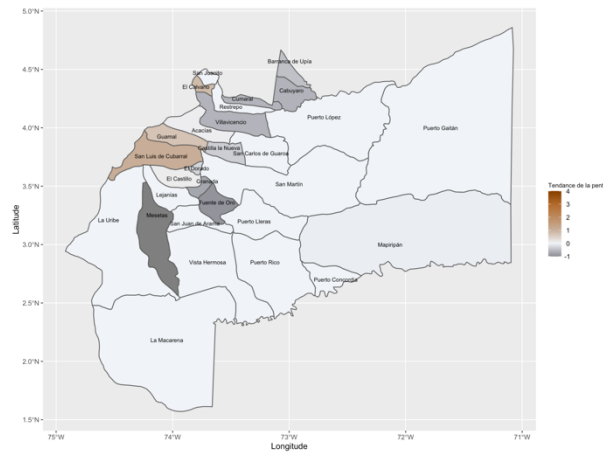
b) 2017-2019



c) 2010-2015



d) 2010-2016



**Figure 24.** Cartes géographiques illustrant la tendance de la pente pour la covariable de température ambiante moyenne hebdomadaire entre (a) 2016-2019, (b) 2017-2019, (c) 2010-2015 et (d) 2010-2016 de chaque municipalité du département de Méta.

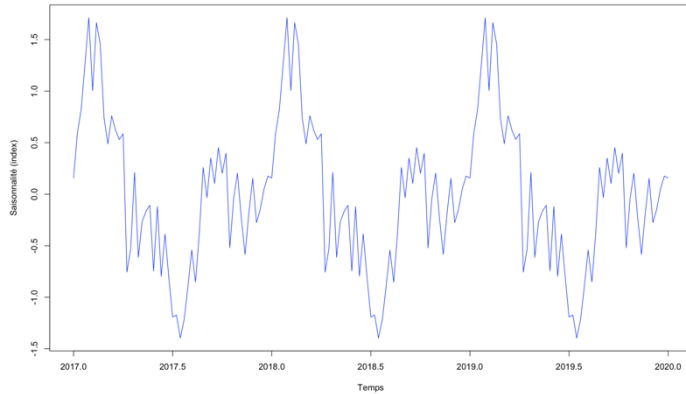
\*Le gradient de couleur indique la pente des valeurs des températures ambiantes moyennes hebdomadaires de chaque municipalité. Les pentes positives, illustrées par des tons de bleus, démontrent une croissance, tandis que les pentes négatives, illustrées par des tons de gris, indiquent une décroissance.

#### 4.1.2.3.2.2 Saisonnalité

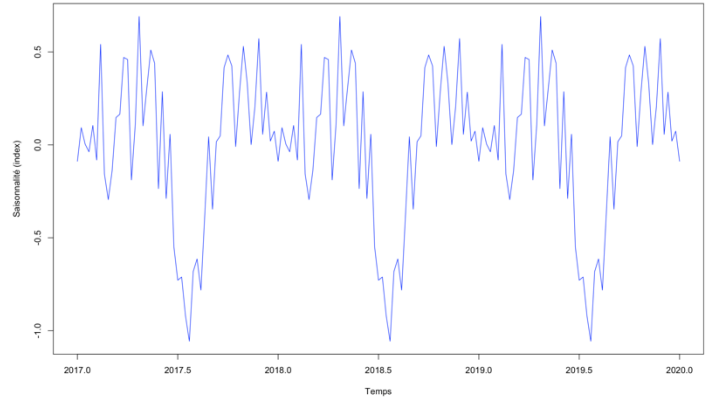
La saisonnalité pour la température ambiante moyenne est représentée à la figure 25. Villavicencio (figure 25a) débute l'année avec une valeur médiane suivie d'une croissance atteignant le pic annuel avant le mois de mars. Par après, on aperçoit une décroissance jusqu'au point minimal au mois de juin. La suite consiste d'une croissance jusqu'à la valeur maximale l'année suivante. Puis, Acacias (figure 25b) démontre une saisonnalité dans une marge définie avec des croissances et décroissances mineures. La particularité réside dans la chute importante des valeurs autour du mois de juin. Cependant, ceci est succédé d'une rehausse des données

rejoignant la marge habituelle. Tout comme Acacias et Villavicencio, La Uribe (figure 25c) voit sa valeur minimale touchée au mois de juin de chaque année. Une croissance succède jusqu'à l'atteinte d'un pic en début d'année, entre janvier et février, puis d'une décroissance.

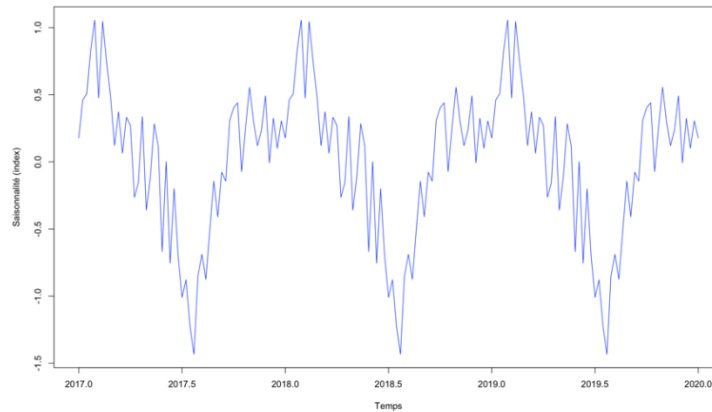
(a)Villavicencio



(b)Acacias



(c)La Uribe

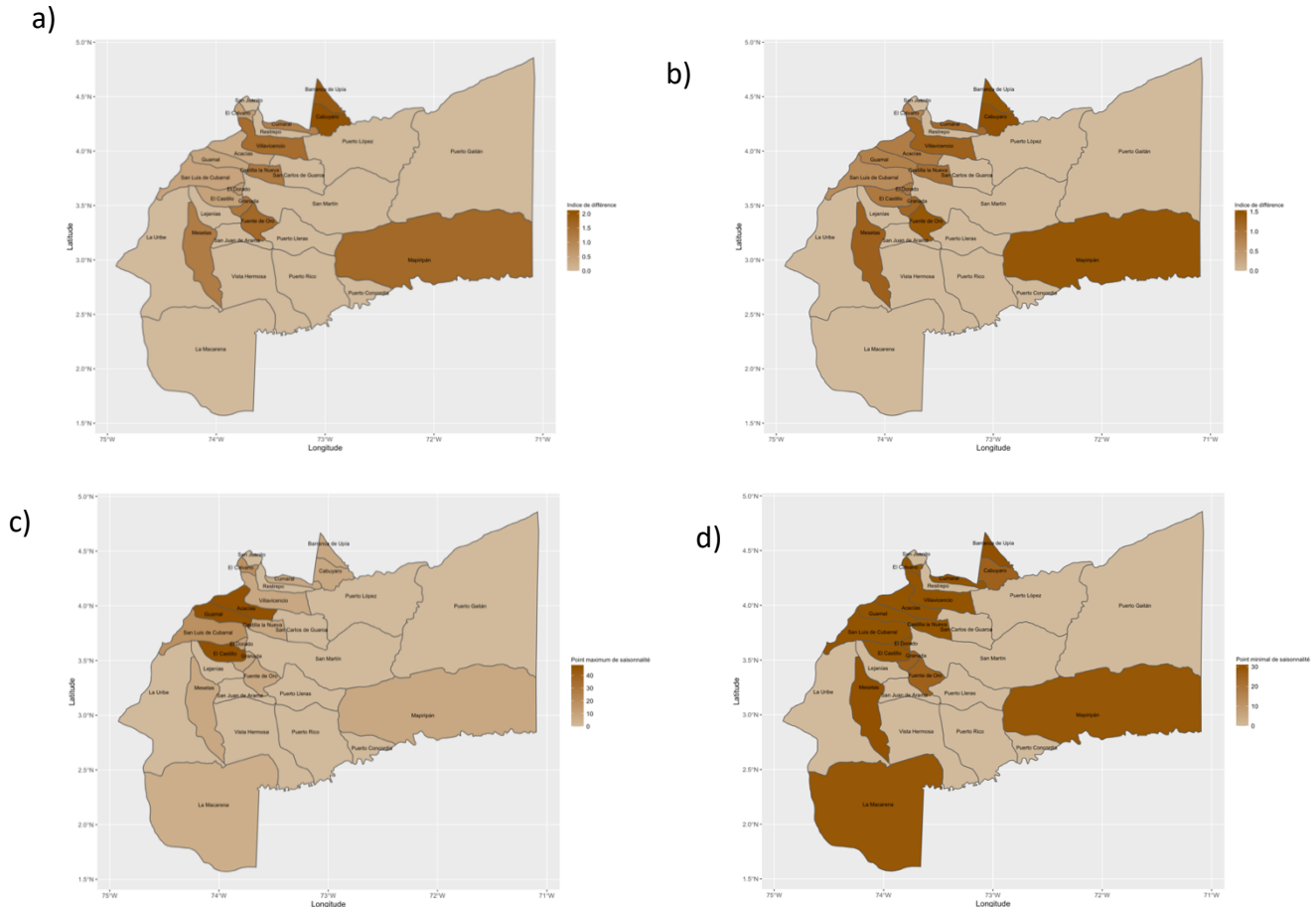


**Figure 25.** Représentation de la saisonnalité entre 2017 et 2019 pour la covariable de températures ambiantes hebdomadaires moyennes dans certaines municipalités du département de Méta.

Pour la température ambiante moyenne hebdomadaire, la distance de la moyenne pour les valeurs maximales et minimales par rapport à la médiane est basse dans l'ensemble avec près de la moitié étant de zéros dépendamment de la marge (figures 26a et 26b). Celles présentant des différences se retrouvent dans le nord-ouest et Mapiripan à l'est du département que ce soit pour les valeurs maximales comme minimales, indiquant une similarité dans la saisonnalité (figures 26a et 26b). Les semaines où les valeurs maximales de la saisonnalité de la température ambiante sont atteintes semblent tourner autour de la même période pour les municipalités du département Méta avec quelques exceptions dont Guamal, El Castillo et Acacias, toutes à la 48<sup>e</sup> semaine (figure 26c).



Pour la valeur minimale, les semaines où celle-ci est atteinte sont subdivisées entre la semaine 0 et les semaines 26 à 31 (figure 26d). Étonnement, Mapiripan, étant entouré de municipalités où la valeur minimale de la saisonnalité est en début d'année, rejoint cette valeur à la 29<sup>e</sup> semaine.



**Figure 26.** Cartes géographiques illustrant la distance de la moyenne des points (a) maximaux et (b) minimaux par rapport à la médiane du département (2010-2019)\* et la semaine d'atteinte des valeurs (c) maximales et (d) minimales de la saisonnalité (2010-2019)\*\* pour la saisonnalité de la covariable de la température ambiante moyenne hebdomadaire de chaque municipalité du département de Méta.

\*Le gradient de couleur indique la différence entre la médiane globale et la moyenne des valeurs minimales ou maximales de chaque municipalité. Plus la valeur est élevée, plus la municipalité diffère du reste du département.

\*\*Le gradient de couleur indique les semaines où les points minimaux et maximaux de la température ambiante moyenne hebdomadaire sont atteints.

En somme, pour l'ensemble des municipalités, la tendance de la température ambiante moyenne hebdomadaire baisse entre 2010 et 2012 suivie d'une rehausse jusqu'au pic en fin 2015 ou début 2016 puis une rechute jusqu'à la fin de la période en 2019. Les variations sont très faibles pour une grande partie des municipalités avec quelques exceptions au Nord-Ouest du département. La saisonnalité varie pareillement à travers du département, le point minimum étant atteint en juin ou juillet et le maximum en janvier ou février.

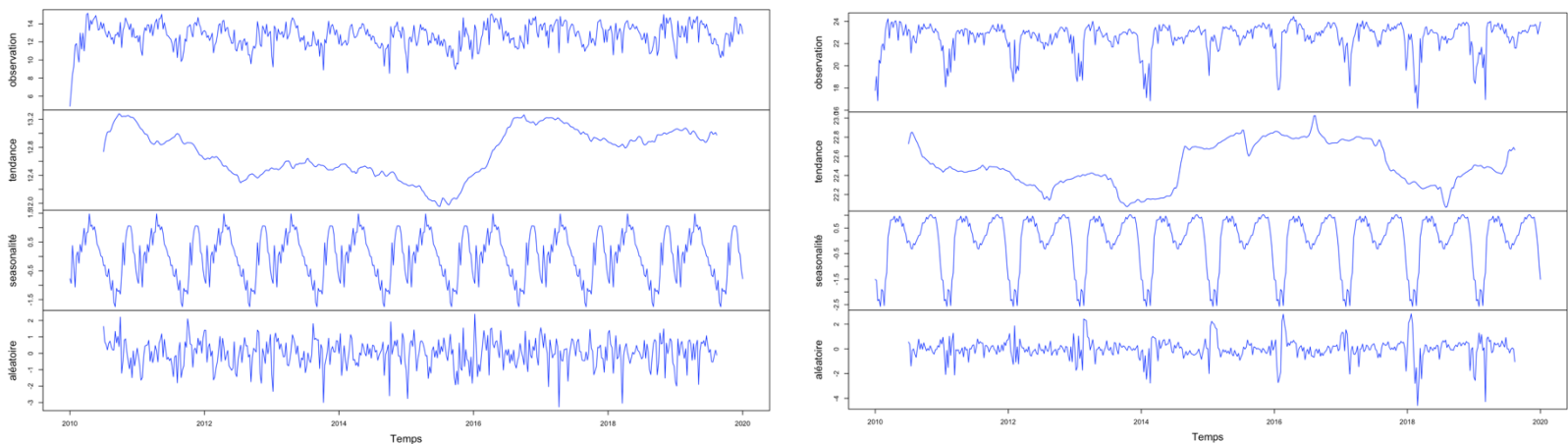
### 4.1.2.3.3 Température du point de rosée moyenne hebdomadaire

#### 4.1.2.3.3.1 Tendances

Les représentations des décompositions de l'ensemble de la municipalité démontrent l'existence de deux tendances quant à la TPR hebdomadaire moyenne dont celle similaire à la municipalité d'Acacias (Figure 27a) et à la municipalité Mapiripan (Figure 27b). Acacias débute avec une tendance assez élevée et se poursuit par une chute graduelle. Une petite rehausse se remarque en 2012 suivie d'une chute en 2013. Puis, une plus grande rehausse s'enchaîne, rejoignant le pic en 2016, suivi également d'une rechute jusqu'à la fin de la période en 2019. Mapiripan se différencie dans le montant de chutes et rehausse étant moins récurrentes dans l'ensemble ainsi que l'atteinte d'un point relativement bas de la tendance en 2018 qui se succède d'une croissance jusqu'à la fin de la période d'intérêt.

(a) Acacias

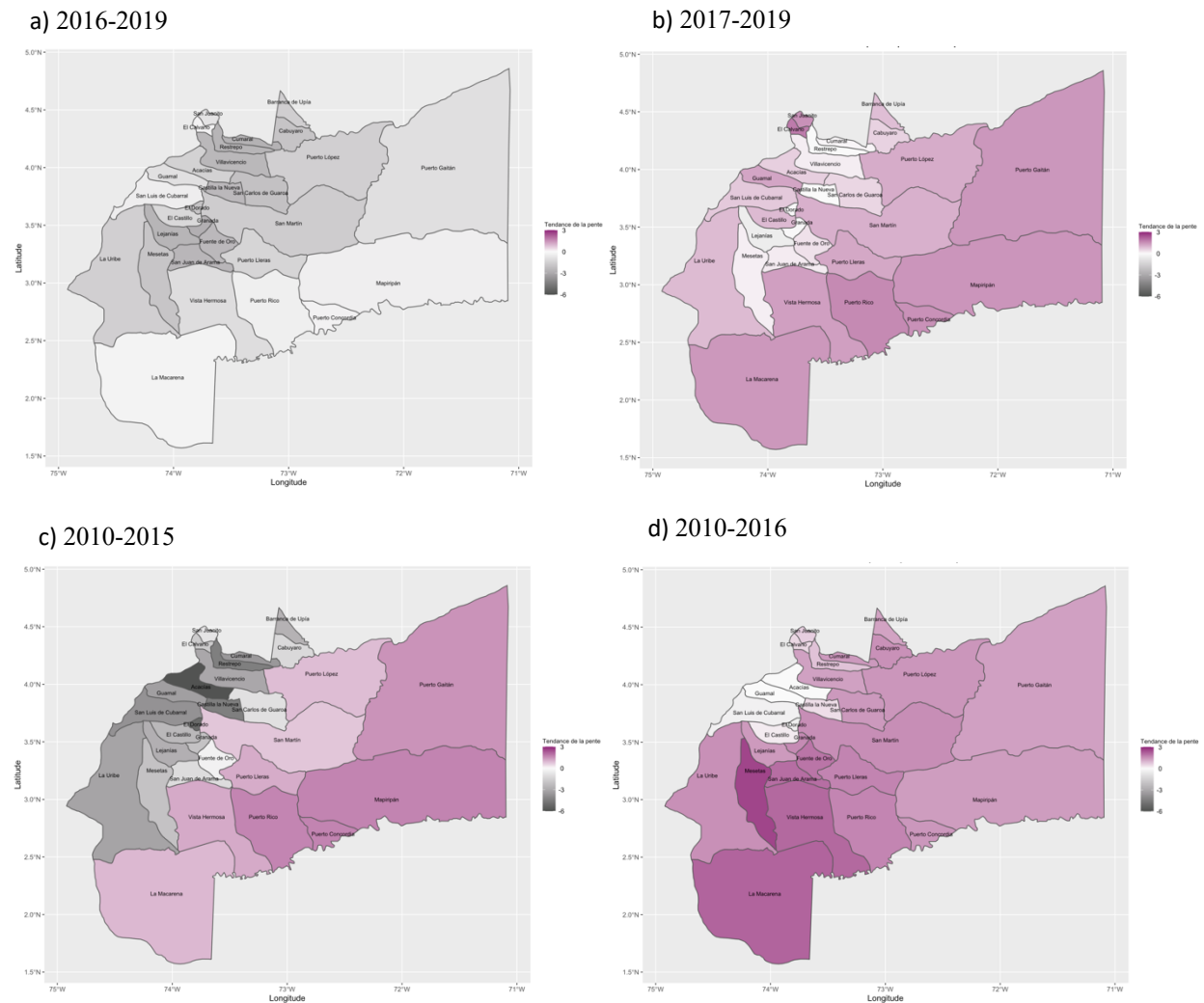
(b) Mapiripan



**Figure 27.** Décomposition de la série temporelle additive de la municipalité de (a) Acacias et (b) Mapiripan représentant la température du point de rosée moyenne hebdomadaire (en °C) à travers les années à l'étude (2010-2019).

Pour ce qui en est de la pente de tendance pour la variable de la TPR hebdomadaire, la première représentation géographique de 2016 à 2019 (figure 28a) nous laisse remarquer que l'ensemble du département de Méta voit des tendances à valeurs négatives. En retirant l'année 2016 de l'analyse (figure 28b), la totalité des municipalités expose des tendances sur la borne positive. La période de 2010 à 2015 (figure 28c) est compartimentée en 2 régions : le nord-ouest où les pentes des tendances sont négatives ainsi que le reste du département avec des pentes de tendances positives. Finalement, entre 2010 et 2016 (figure 28d), l'entièreté de Méta présente des

pentas positives à l'exception d'une portion du nord-ouest où celles-ci tendent vers la valeur nulle. Mesetas est ici la municipalité avec la tendance la plus élevée.



**Figure 28.** Cartes géographiques illustrant la tendance de la pente entre (a) 2016-2019, (b) 2017-2019, (c) 2010-2015 et (d) 2010-2016 de chaque municipalité du département de Méta.

\*Le gradient de couleur indique la pente des valeurs des températures du point de rosée moyennes hebdomadaires de chaque municipalité. Les pentes positives, illustrées par des tons de bleus, démontrent une croissance, tandis que les pentes négatives, illustrées par des tons de gris, indiquent une décroissance.

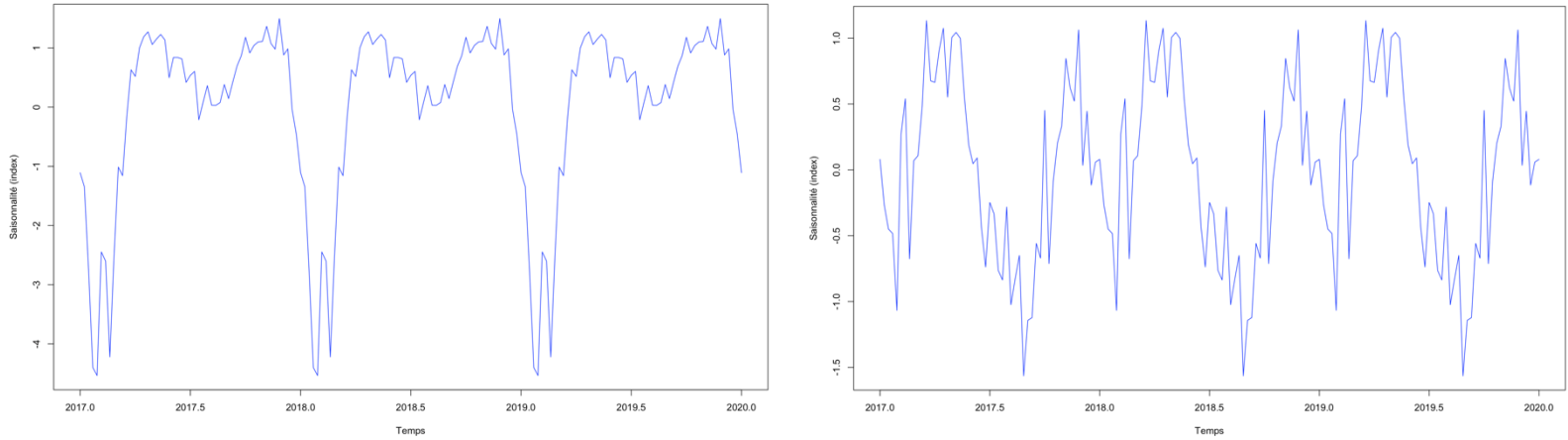
#### 4.1.2.3.3.2 Saisonnalité

La saisonnalité quant à la TPR (figure 29) au sein du département ne variait pas énormément. Deux municipalités servent d'exemple pour les types de courbes existantes pour la saisonnalité. D'abord, San Carlos de Guaroa (figure 29a) démontre des valeurs dans une marge limitée avec une chute mineure autour du mois de juin ainsi qu'une décroissance majeure en début d'année, soit entre janvier et février. Toutefois, San Juanito (figure 29b) démontre une saisonnalité

considérablement plus variable avec davantage de courbes de croissance et décroissance. Le point minimal est ici atteint au mois d'aout et le point maximal au milieu du premier semestre.

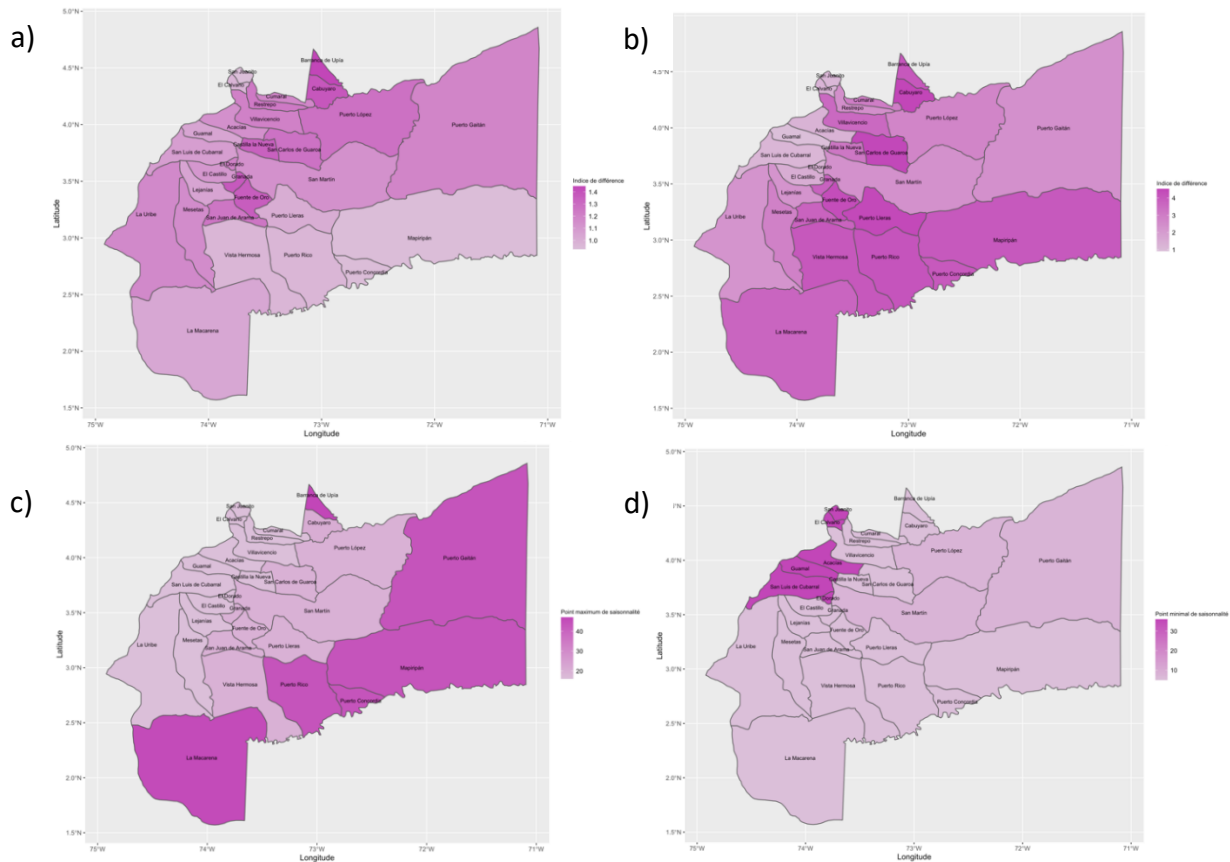
(a) San Carlos De Guaroa

(b) San Juanito



**Figure 29.** Représentation de la saisonnalité entre 2017 et 2019 pour la covariable de température du point de rosée hebdomadaire moyenne à (a) San Carlos De Guaroa et (b) San Juanito.

La distance de la moyenne des points maximaux par rapport à la médiane est assez proche dans l'ensemble (figure 30a). Le sud-est du département démontre des valeurs inférieures au reste de Méta. Pour les valeurs minimales, de plus grandes différences par rapport à la médiane sont observées, notamment dans la région sud et Cabuyaro et San Carlos de Guaro au nord (figure 30b). Les périodes où ces valeurs sont atteintes peuvent énormément différer au sein du département. Les valeurs maximales de la saisonnalité sont atteintes plus tardivement au Sud et à l'est du département ainsi qu'à Barranca de Upia (figure 30c). Pour les valeurs minimales (figure 30d), les municipalités de Guamal, d'Acacias, de San Luis de Cubarral, d'El Dorado, de San Juanito et d'El Calvario les touchant à la 36<sup>e</sup> semaine de l'année. La majorité des autres municipalités se rendent à ces valeurs à la 5<sup>e</sup> semaine.



**Figure 30.** Cartes géographiques illustrant la distance de la moyenne des points (a) maximaux et (b) minimaux par rapport à la médiane du département (2010-2019)\* et la semaine d'atteinte des valeurs (c) maximales et (d) minimales de la saisonnalité (2010-2019)\*\* pour la saisonnalité de la covariable de la température du point de rosée hebdomadaire de chaque municipalité du département de Méta.

\*Le gradient de couleur indique la différence entre la médiane globale et la moyenne des valeurs minimales ou maximales de chaque municipalité. Plus la valeur est élevée, plus la municipalité diffère du reste du département.

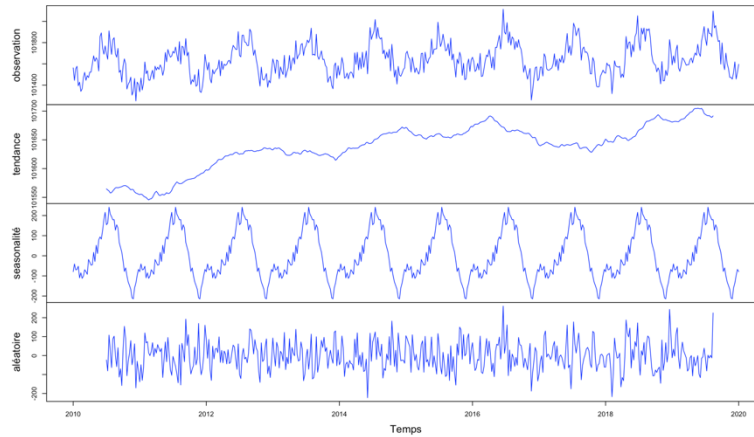
\*\*Le gradient de couleur indique les semaines où les points minimaux et maximaux de la température du point de rosée hebdomadaire sont atteints.

En somme, le début de la période (2010-2015) est subdivisé entre les municipalités du Nord-Ouest du département présentant des tendances décroissantes et le reste démontrant des croissances pour la variable de température moyenne hebdomadaire du point de rosée (TPR). En analysant la saisonnalité, on voit qu'elle atteint ses valeurs maximales et minimales à deux différents moments dans l'année : maximum autour de la 20<sup>e</sup> et 45<sup>e</sup> semaines de l'année et minimum autour de la 10<sup>e</sup> et 35<sup>e</sup> semaine.

#### 4.1.2.3.4 Pression hebdomadaire moyenne au niveau de la mer

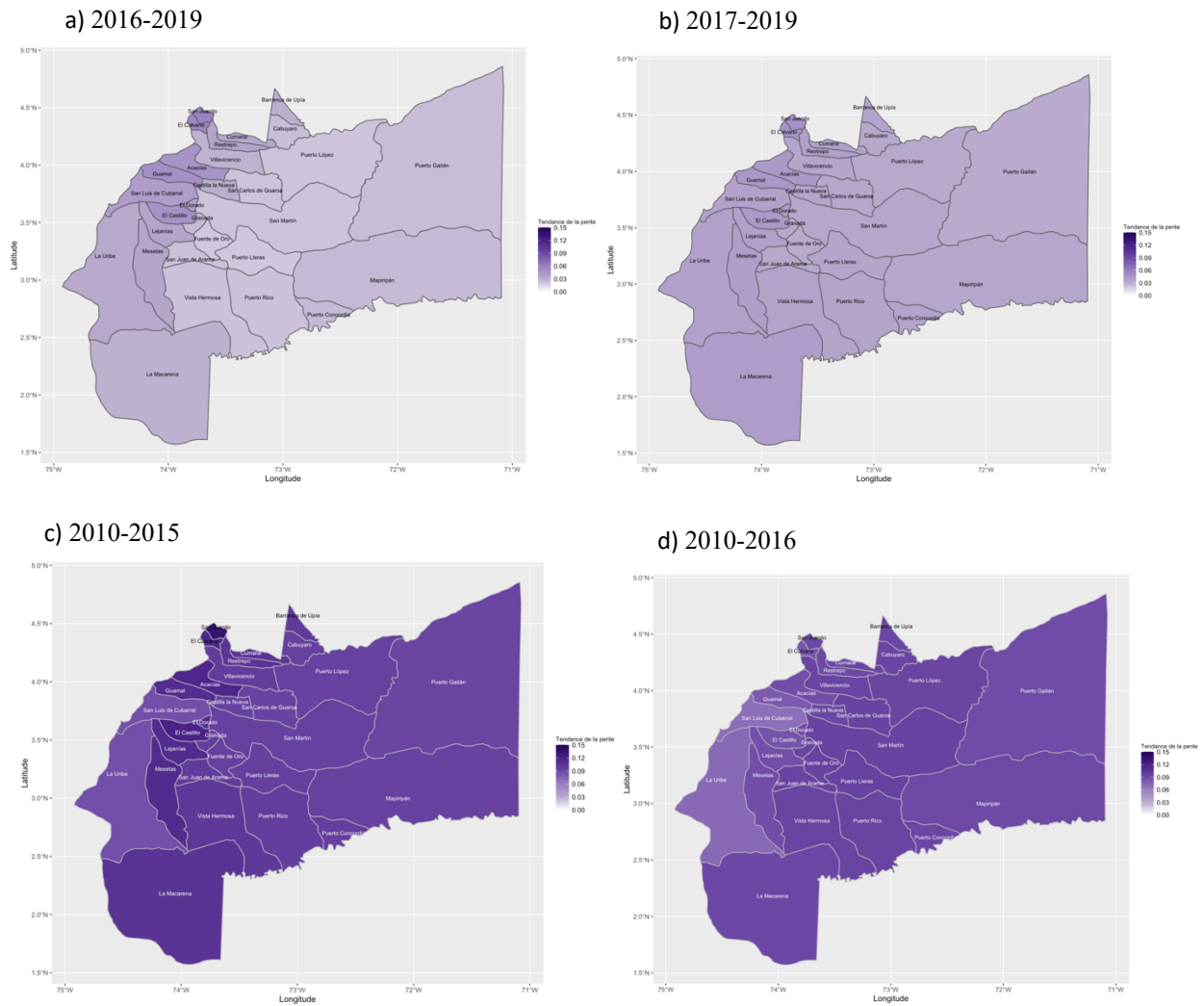
##### 4.1.2.3.4.1 Tendance

La tendance de la pression au niveau de la mer est similaire à travers le département avec une croissance modérée jusqu'à l'année 2016, suivi d'une rechute, puis une rehausse à partir de 2018. La valeur maximale est atteinte vers la fin de l'année 2019. Acacias sert d'exemple à la figure 31.



**Figure 31.** Décomposition de la série temporelle additive de la municipalité d'Acacias représentant la pression moyenne hebdomadaire au niveau de la mer (en Pa) à travers les années à l'étude (2010-2019).

La pente de la tendance de la pression au niveau de la mer consiste à de très petites valeurs ne dépassant pas les 0.025 et étant toutes positives, c'est-à-dire croissantes dans l'ensemble des intervalles étudiés. Nous observons qu'entre 2010 et 2015 (figure 32c) et entre 2010 et 2016 (figure 32d), les tendances de la pente pour cette covariable sont plus élevées que les deux autres marges (figure 32a et 32b). San Juanito reflète entre 2010 et 2015 la pente de la tendance la plus élevée, indiquant la plus grande augmentation des valeurs.

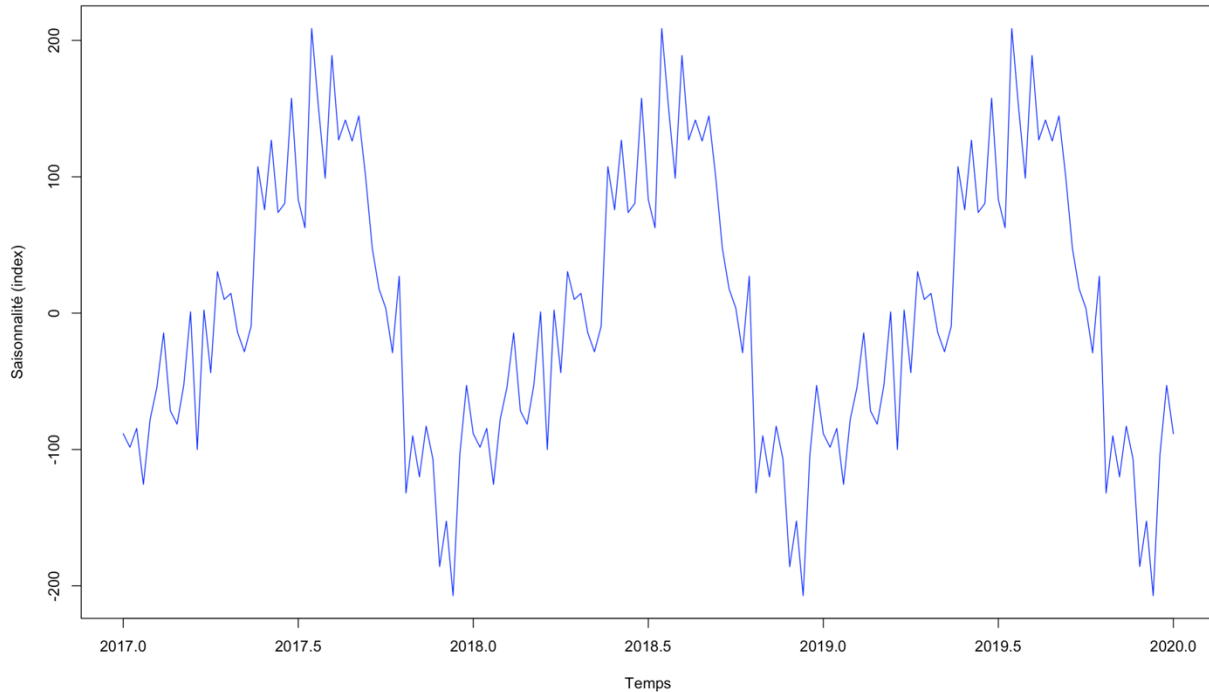


**Figure 32.** Cartes géographiques illustrant la tendance de la pente de la covariable de la pression au niveau de la mer moyenne hebdomadaire entre (a) 2016-2019, (b) 2017-2019, (c) 2010-2015 et (d) 2010-2016 de chaque municipalité du département de Méta.\*

\*Le gradient de couleur indique la pente des valeurs de la pression moyenne hebdomadaire au niveau de la mer de chaque municipalité. Les pentes positives, illustrées par des tons de bleus, démontrent une croissance, tandis que les pentes négatives, illustrées par des tons de gris, indiquent une décroissance.

#### 4.1.2.3.4.2 Saisonnalité

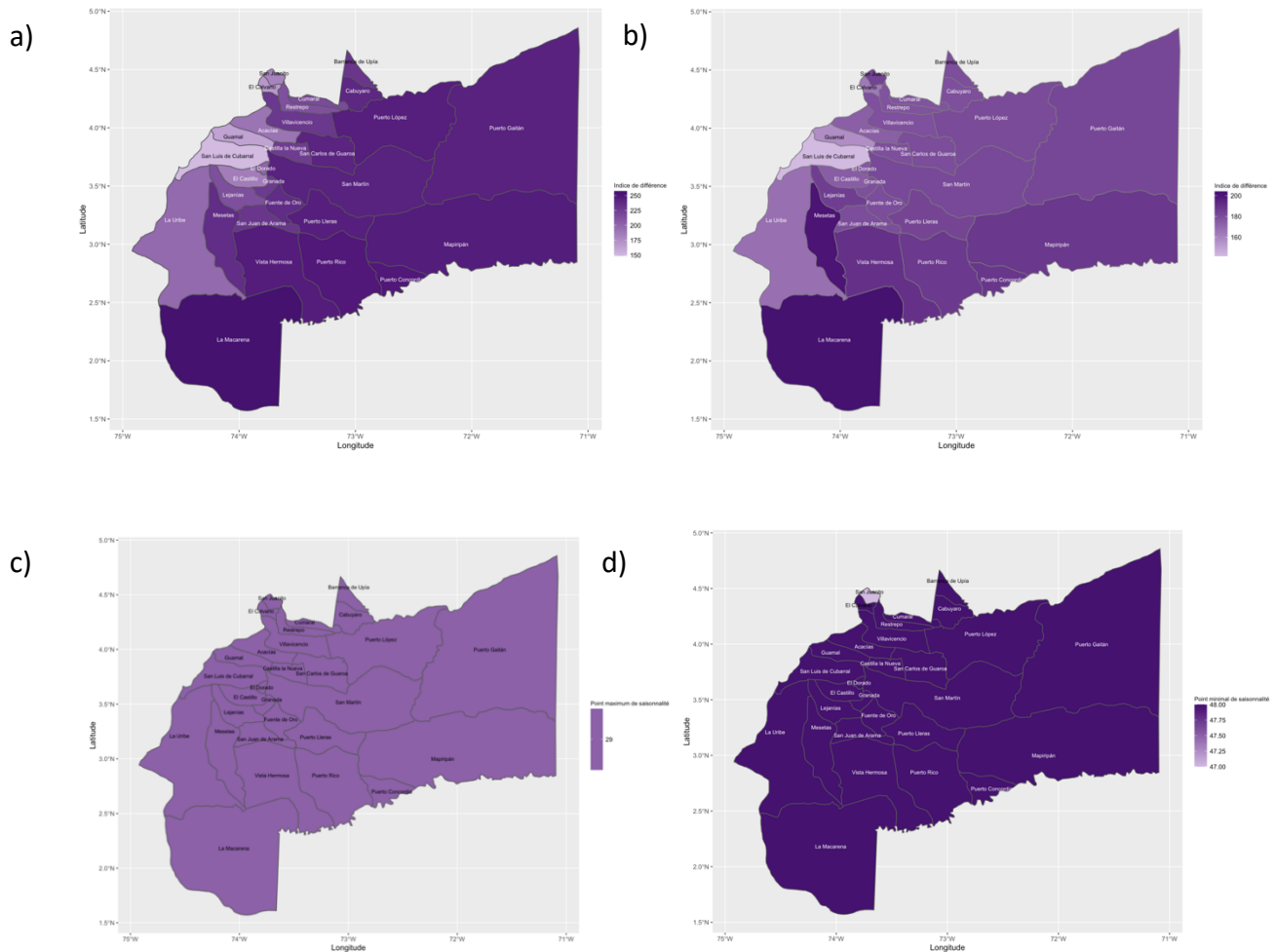
La pression moyenne hebdomadaire au niveau de la mer (figure 33) a une saisonnalité uniforme au sein de l'entièreté du département. La municipalité de San Luis de Cubarral est utilisée à titre d'exemple ci-dessous. Le pic est atteint au mois de juin et le point minimal en fin d'année soit entre la fin du mois de novembre et le début du mois de décembre. La période entre ces deux points est qualifiée d'une chute ou d'une croissance interceptée de fluctuations mineures.



**Figure 33.** Représentation de la saisonnalité entre 2017 et 2019 pour la covariable de la pression moyenne hebdomadaire au niveau de la mer dans la municipalité de San Luis de Cubarral.

Étant donné que les valeurs de la pression au niveau de la mer sont de grandes valeurs, les distances des moyennes de la médiane générale le sont également. Nous pouvons constater qu'autant pour les valeurs minimales que maximales (figure 34a et 34b), les indices sont moyennement élevés à élevés. San Luis de Cubarral est une municipalité qui se distingue avec des valeurs inférieures dans les deux cas. Comme illustré dans la figure 34c, la totalité des municipalités atteint leur point maximum à la semaine 29 pour les valeurs maximales de la pression au niveau de la mer. Pour ce qui en est des valeurs minimales (figure 34d), la 48<sup>e</sup> semaine est celle où le point minimum est atteint. San Juanito est l'exception où la semaine d'intérêt est la 47<sup>e</sup>.





**Figure 34.** Cartes géographiques illustrant la distance de la moyenne des points (a) maximaux et (b) minimaux par rapport à la médiane du département (2010-2019)\* et la semaine d'atteinte des valeurs (c) maximales et (d) minimales de la saisonnalité (2010-2019)\*\* pour la saisonnalité de la covariable de la pression moyenne hebdomadaire au niveau de la mer de chaque municipalité du département de Méta.

\*Le gradient de couleur indique la différence entre la médiane globale et la moyenne des valeurs minimales ou maximales de chaque municipalité. Plus la valeur est élevée, plus la municipalité diffère du reste du département.

\*\*Le gradient de couleur indique les semaines où les points minimaux et maximaux de la pression moyenne hebdomadaire au niveau de la mer sont atteints.

En somme, la pente de la tendance de la covariable de la pression hebdomadaire moyenne au niveau de la mer croit dans l'ensemble avec le début de la période (2010-2016) démontrant des valeurs davantage élevées. Annuellement, les pics de la saisonnalité sont atteints à la 29<sup>e</sup> semaine pour l'ensemble. Les points minimaux sont touchés à la 48<sup>e</sup> semaine.

## 4.2 Objectif 2

**Identifier les prédicteurs météorologiques et environnementaux significatifs ainsi que leurs décalages influençant l'incidence de la dengue à travers le temps et l'espace et les utiliser pour une description exhaustive de la fluctuation de la maladie**

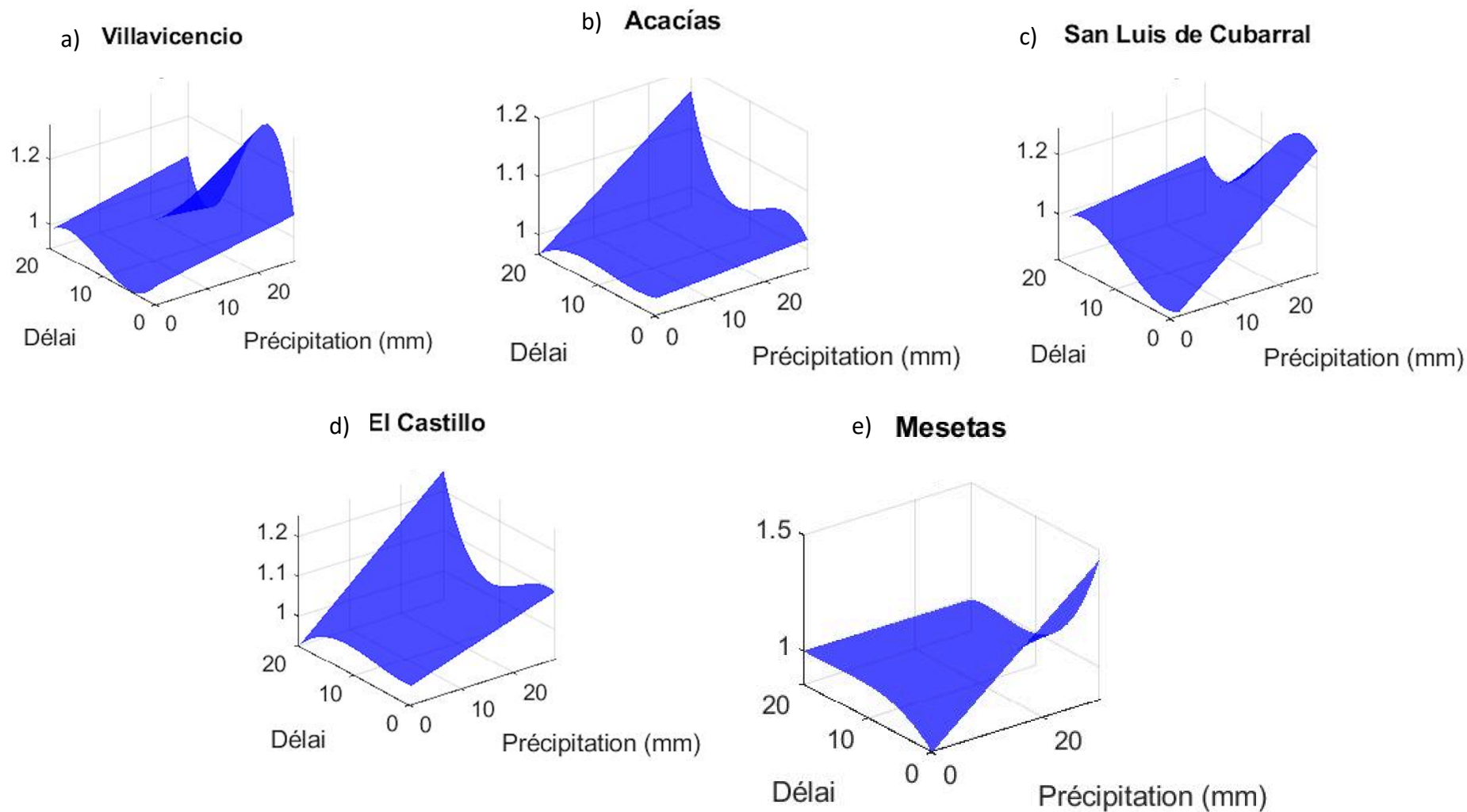
Pour la présente section, nous avons modélisé les données par des modèles à changement de régime de Markov caché (HMM), les régimes étant des variables latentes avec un nombre fini de valeurs. En ce qui concerne ces derniers, nous avons pris en compte des modèles à régimes allant de 1 à 6 pour l'ensemble des variables d'intérêt ainsi que leurs décalages. Plus spécifiquement, nous avons eu recours à des HMMX avec des B-Spline en testant des HMM avec une distribution Poisson, HMMX avec une distribution Poisson gonflée en 0, HMMX avec une distribution binomiale négative, HMMX avec une distribution binomiale négative gonflée à 0. Ces manipulations nous ont permis l'obtention de risques relatifs ainsi que les valeurs de décalages à laquelle ils sont atteints pour chacune des 29 municipalités de Méta.

Comme pour les autres parties de ce mémoire, nous avons sélectionné certaines figures à présenter de sorte à ressortir les principaux résultats au sein du département de Méta.

### 4.2.1.1 Précipitations moyennes hebdomadaires

Pour plusieurs municipalités, le risque relatif (RR) de l'incidence de la dengue augmente proportionnellement avec l'augmentation des précipitations moyennes hebdomadaires. Pour la majorité, il atteint son pic aux alentours d'un décalage (*lag*) de 4 ou 20 semaines. À titre d'exemple, Villavicencio (figure 35a) présente un RR d'environ 1.3 à un décalage de 4 semaines et une valeur de précipitations maximales excédant les 20 mm. Ceci ne s'applique pas pour Acacias (figure 35b) où le RR le plus élevé (1.15) est en temps réel (décalage = 0) pour la valeur de précipitations maximale. Un RR inférieur à 1 est uniquement observé à une valeur presque nulle de précipitations avec un décalage qui tend vers le zéro. San Luis de Cubarral (figure 35c) démontre une particularité étant donné qu'à un décalage de 20 semaines et des précipitations maximales, la valeur du RR atteint 1.2. Le pic du RR (1.16) pour cette municipalité demeure à un décalage de 1 à 4 semaines et à des valeurs de précipitations maximales. Le RR inférieur à 1 est maintenu à moins de 10 mm de précipitations indépendamment du décalage. El Castillo (figure 35d) voit son RR atteindre la valeur maximale (1.15) à un décalage de 20 semaines. À moins de 6 mm de précipitations pour tout décalage, le risque est diminué. Mesetas (figure 35e) en est une autre qui se distingue. Nous

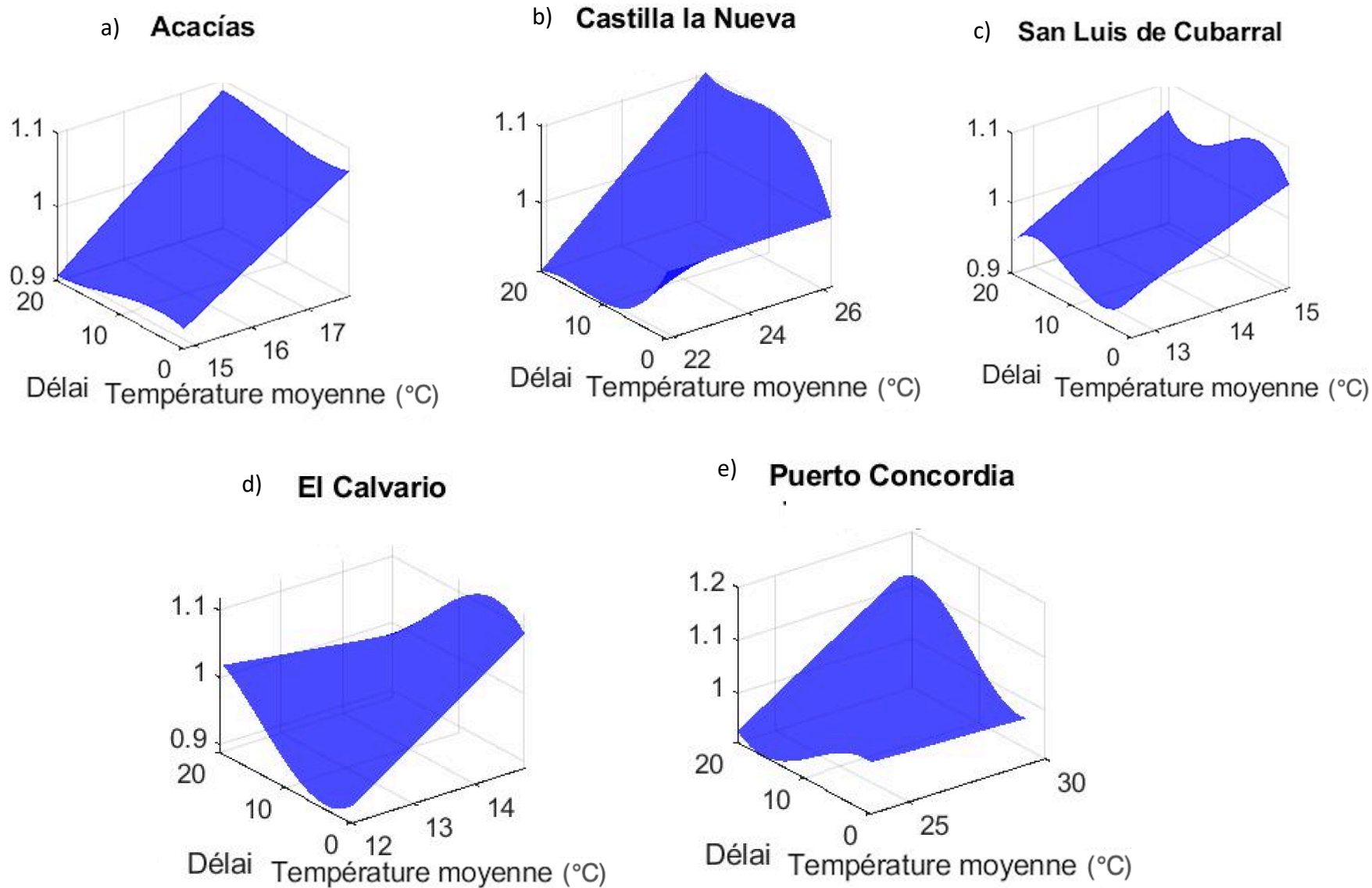
observons qu'en temps réel (décalage = 0) et à une valeur de précipitation maximale (environ 30 mm), le RR est à sa valeur maximale (1.3). Toujours à la valeur maximale de précipitations, plus le décalage croît, plus le RR diminue. Lorsque celui-ci atteint 1 à un décalage d'environ 10 semaines, il stagne et demeure constant. De 10 à 20 semaines de décalage, le RR demeure constant malgré l'augmentation des précipitations. Le RR inférieur à 1 est témoigné à une valeur presque nulle de précipitations et de décalage. De façon globale, il se doit du décalage et de la valeur des précipitations d'être faibles pour qu'il n'y ait pas de risque de dengue.



**Figure 35.** Le risque relatif (RR) de la dengue basé sur le décalage (en semaines) de la covariable de précipitations moyennes hebdomadaires pour les municipalités (a) Villavicencio, (b) Acacias, (c) San Luis de Cubarral, (d) El Castillo et (e) Mesetas.

#### 4.2.1.2 Température ambiante moyenne hebdomadaire

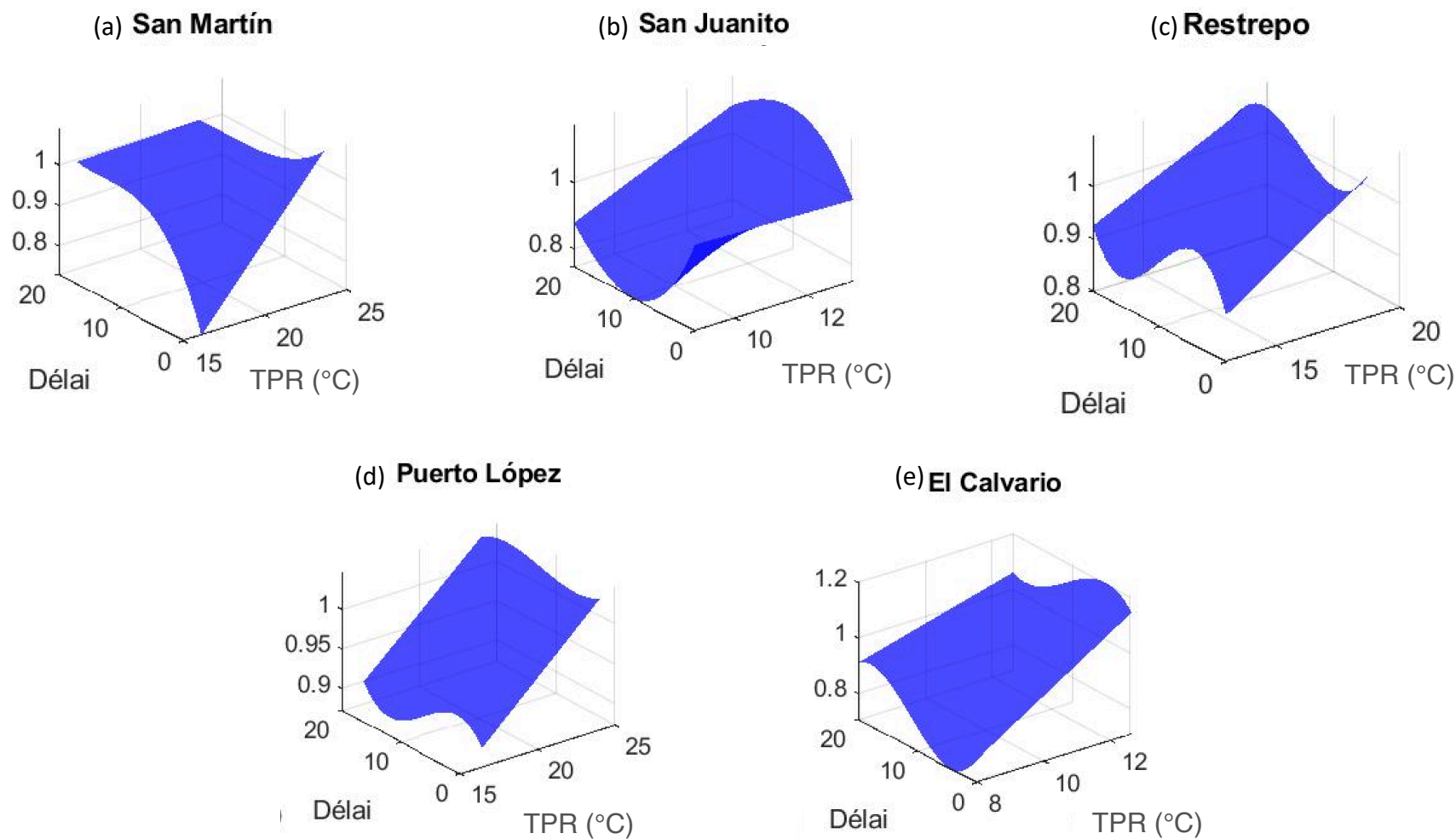
Les RR de la température ambiante moyenne hebdomadaire se manifestent à travers Méta de cinq différentes façons. La première est représentée par Acacias (figure 36a) où le RR augmente proportionnellement avec l'augmentation de la valeur de la température ambiante moyenne pour tous les valeurs de décalage. À une température d'environ 16.2°C, l'effet de la température passe d'une association négative à une association positive, donc un risque élevé de la maladie. Le RR maximal (1.1) est atteint à une température maximale pour la municipalité (environ 18°C) et un délai de 20 semaines. À Castilla La Nueva (figure 36b), pour une température maximale (environ 26°C), le RR est à son pic (1.1) pour un décalage entre 10 et 20 semaines. Le RR inférieur à 1 est observé au sein de cette municipalité à moins de 24°C indépendamment du décalage. La particularité de la municipalité de San Luis de Cubarral (figure 36c) repose sur la transition évidente du RR d'inférieur à supérieur à 1 à une température de 14°C. Le pic (RR = 1.087) ainsi que le point minimal du RR (RR = 0.920) se logent à un délai de 5 semaines à la température minimale et maximale. Sur un point de vue de décalage, on observe une courbe inverse entre la borne minimale et maximale de la température : d'un côté, elle débute à un point minimal et croit, de l'autre, elle débute à un point maximal et décroît. Puis, à El Calvario (figure 36d), le RR maximal (RR = 1.118) et minimal (RR = 0.888) est également aperçu à un décalage de 5 semaines pour la valeur minimale et maximale. À un décalage nul, le RR fluctue avec la température, posant un risque pour la dengue (RR>1) à environ 13.5°C. Le RR fluctue moindrement à un décalage de 20 semaines sans tenir compte de la température. Finalement, à Puerto Concordia (figure 36e), le RR croît avec le nombre de semaines de décalage ainsi qu'avec la température. À une valeur maximale (30°C), il atteint un RR de 1.12. L'association négative (RR<1) est uniquement observée à moins de 25°C et à un décalage de plus de 10 semaines.



**Figure 36.** Le risque relatif (RR) de la dengue basé sur le décalage (en semaines) de la covariable de température moyenne hebdomadaire de l'air pour les municipalités (a)Acacias, (b) Castilla La Nueva, (c) San Luis de Cubarral, (d) El Calvario et (e)Puerto Concordia.

### 4.2.1.3 Température du point de rosée moyenne hebdomadaire

La TPR à San Martin (figure 37a) présente un premier type de courbe existant dans le département de Méta. Le RR est à son pic à un décalage nul et une température de point de rosée de presque 25°C. La transition du RR d'inférieur à supérieur à 1 de la dengue se situe à une température d'au moins 22°C pour un décalage de moins que 10 semaines. À San Juanito (figure 37b), nous observons un effet contraire entre la borne de 8 à 11°C et de 11 à 13°C. En effet, la première expose un effet diminué avec un RR minimal (RR = 0.7464) à un décalage de 11 semaines et une température de 8°C. Le RR maximal (RR = 1.175) est à un décalage de 11 semaines pour une température de 12°C. Restrepo (figure 37c) se voit atteindre la valeur maximale du RR (RR = 1.08) à une température d'environ 19°C pour un décalage de 19 semaines. L'association la plus négative (RR = 0.875), quant à elle, est visualisée à un décalage de 0 pour une température de 15°C. Puerto Lopez (figure 37d) démontre un RR maximal (RR = 1.046) à une température de 25°C et un décalage de 16 semaines. Pour ce qui est du risque diminué, il est témoigné à un point minimal de 17°C et un décalage de 15 semaines. À 20 semaines de décalage, le RR augmente au fur et à mesure que la température augmente, en passant à la borne supérieure à 1 du RR à plus de 23°C. Finalement, à El Calvario (figure 37e), au même décalage de 4 à 5 semaines, on observe la valeur minimale du RR (RR=0.705) à environ 8°C et la valeur maximale (RR = 1.203) à presque 12 °C. À 0 et 20 semaines de décalage, le risque croît avec l'augmentation de la température, posant un risque pour la maladie à plus de 11°C. L'augmentation de la température varie davantage à un délai nul que maximal (20 semaines).

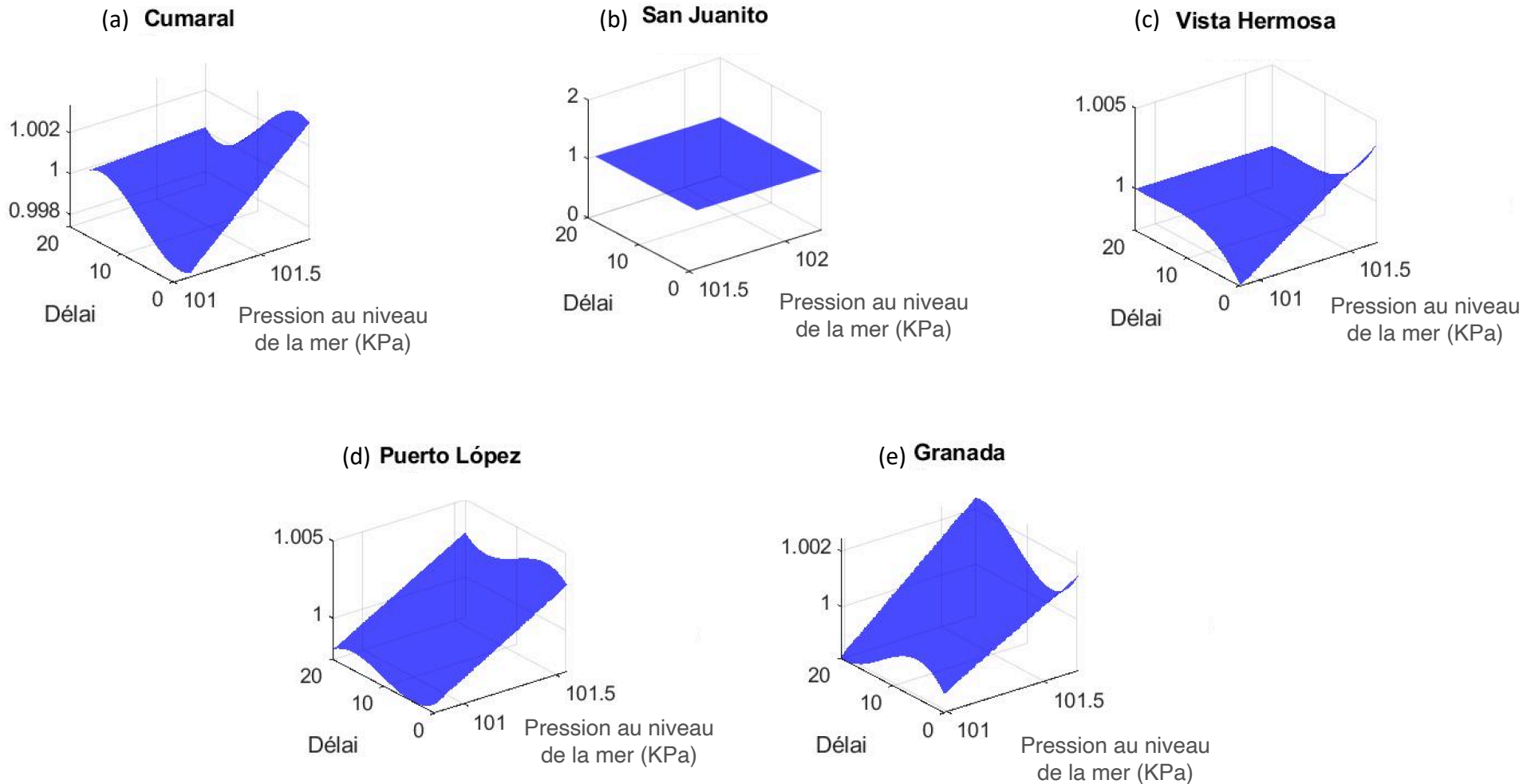


**Figure 37.** Le risque relatif (RR) de la dengue basé sur le décalage (en semaines) de la covariable de la température du point de rosée moyenne hebdomadaire pour les municipalités (a) San Martín, (b) San Juanito, (c) Restrepo, (d) Puerto Lopez et (e) El Calvario.



#### **4.2.1.4 Pression hebdomadaire moyenne au niveau de la mer**

Enfin, la pression hebdomadaire moyenne au niveau de la mer présente moins de variations. À Cumaral (figure 38a), San Juanito (figure 38b) et Vista Hermosa (figure 38c), le RR est à 1 pour des décalages de 20 semaines de la covariable. À l'exception de San Juanito (figure 38b) où aucune variation n'est observée à travers l'ensemble du graphique, une valeur nulle de décalage a démontré un passage du RR de la borne inférieure à 1 vers supérieur à 1 avec la croissance de la pression. À Vista Hermosa et Cumaral, à un décalage de moins de 10 semaines, nous remarquons que les RR des valeurs de pressions minimales et maximales croissent vers des bornes opposées, soit supérieur à 1 pour la borne maximale et inférieur à 1 pour la borne minimale.



**Figure 38.** Le risque relatif (RR) de la dengue basé sur le décalage (en semaines) de la covariable de la pression au niveau de la mer moyenne hebdomadaire pour les municipalités (a) Cumaral, (b) San Juanito, (c) Vista Hermosa, (d) Puerto Lopez et (e) Granada.

En somme, les RR ne démontrent pas de comportement uniforme à travers de Méta. Pour la plupart des municipalités, les RR de la dengue augmentent proportionnellement avec la valeur de la covariable. De plus, pour l'ensemble, la pente de croissance la plus élevée est perçue à 4-5 ou 20 semaines de décalage. Ce risque est à égal 1 pour certaines municipalités (p.ex. San Juanito pour la pression au niveau de la mer).

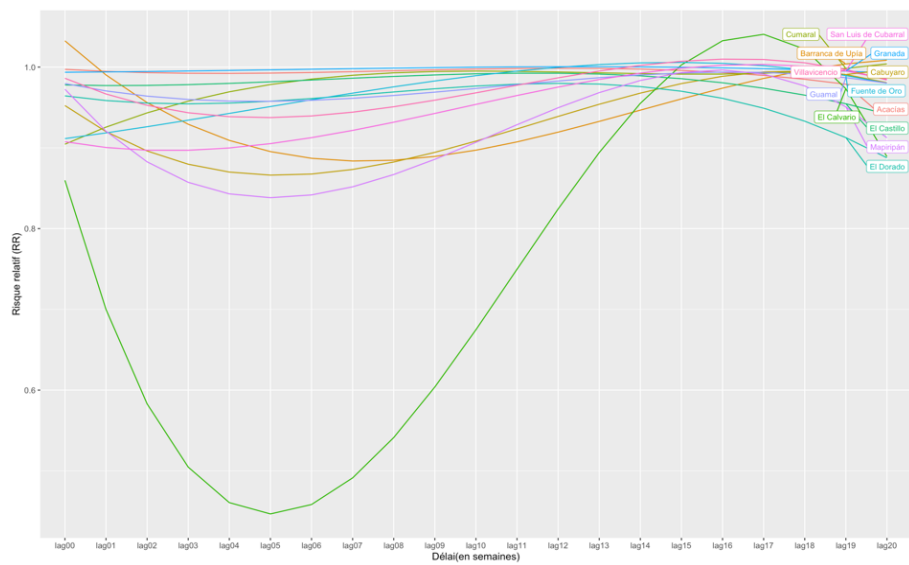
#### **4.2.2 Analyses graphiques du risque**

La partie suivante a pour but de comparer les valeurs de chaque covariable, le risque relatif ainsi que les décalages. Pour une présentation des résultats plus compacte, nous avons opté pour les figures des quantiles à 10%,50%,75% et 95% (figures 39 à 46).

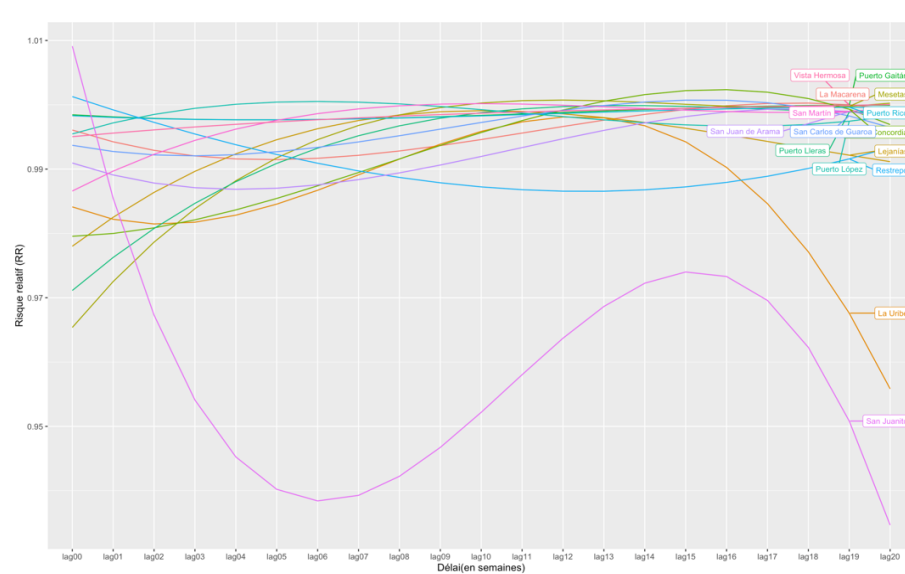
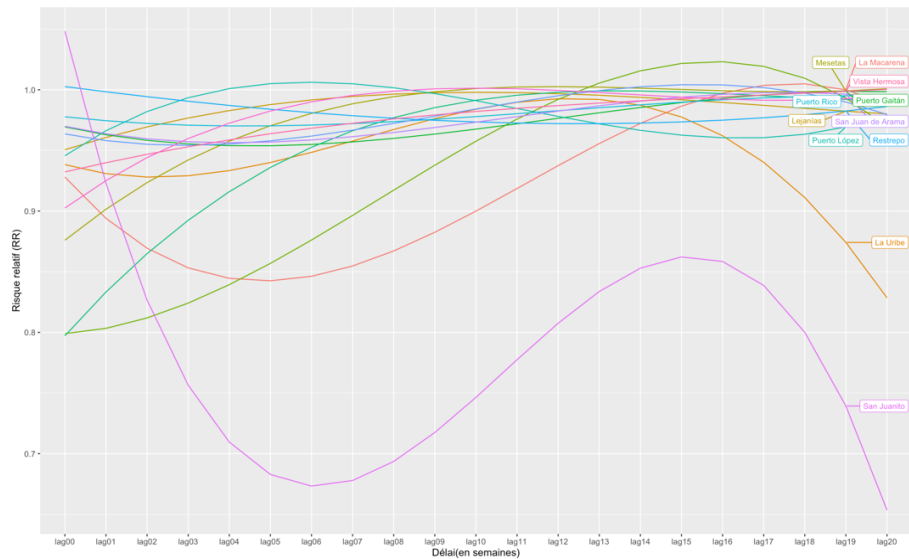
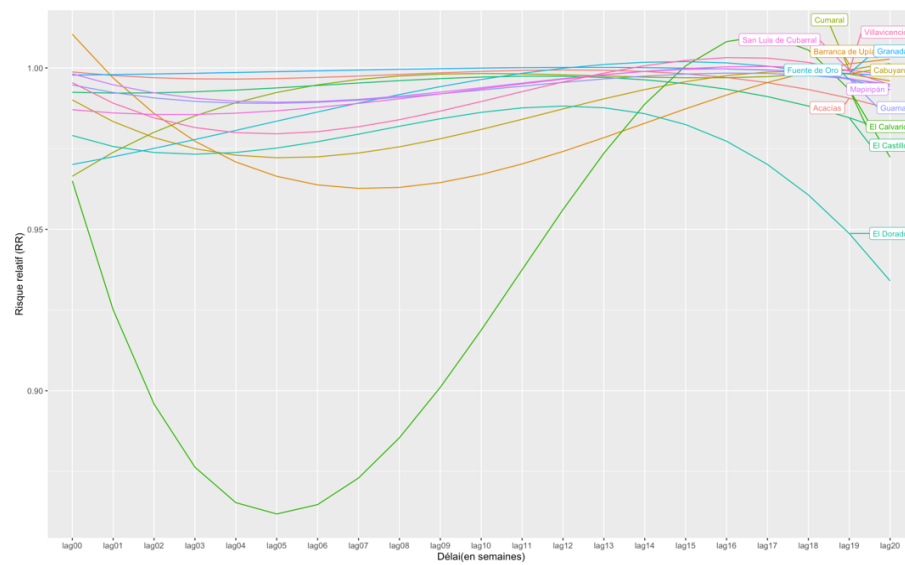
##### **4.2.2.1 Précipitations moyennes hebdomadaires**

Tout d'abord, nous observons qu'à des quantiles de 10% et 50% (figures 39a et 39b), c'est-à-dire à des valeurs faibles et médianes, les précipitations présentent des RR inférieurs à 1 à l'exception de la municipalité d'El Calvario entre 15 et 18.5 semaines de décalage ainsi que San Juanito et Barranca de Upia à moins d'une demi-semaine de décalage. À des valeurs au troisième quantile et élevées, soit 75% et 95% (figures 40a et 40b), les RR transitionnent de supérieurs à inférieurs à 1. À un quantile de 95% (figure 40b), El Calvario atteint le RR maximal pour l'incidence de la dengue due aux précipitations : 1.95 à un décalage de 5 semaines. En deuxième position, nous retrouvons San Juanito : 1.55 à un décalage de 6 semaines. À Q95, pour la majorité des municipalités, la courbe croît jusqu'à un décalage de 8 semaines et se poursuit par une décroissance jusqu'à un décalage d'environ 17 semaines. La courbe se termine par une croissance qui, dans quelques cas, atteint le point maximal du RR de la municipalité. Ainsi, le risque de dengue associé aux précipitations est à son pic pour une grande partie du département entre 4 à 8 semaines de décalages ou à partir de la 17<sup>e</sup> semaine. El Calvario et San Juanito se démarquent considérablement des autres avec de plus grandes variations pour tous les quantiles présentés.

(a) Quantile 10%

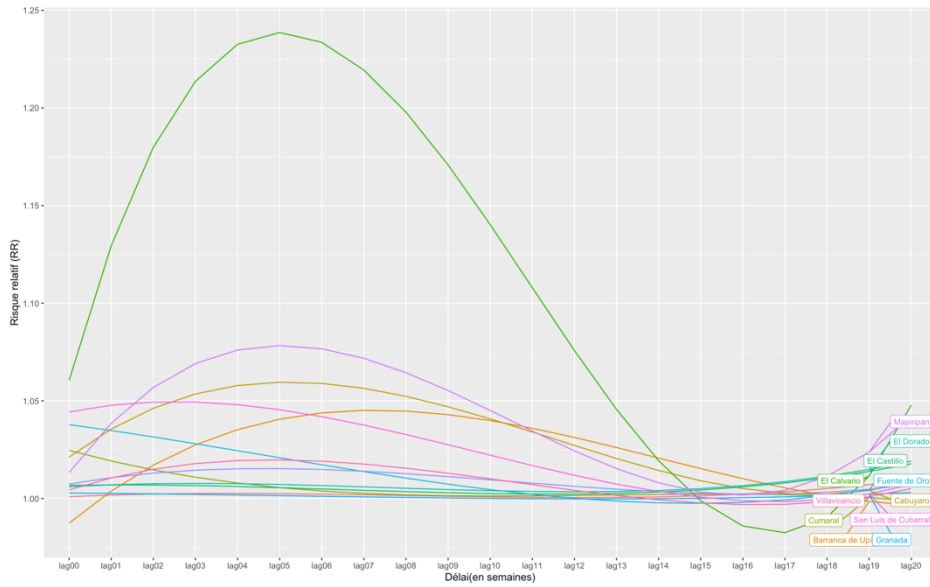


(b) Quantile 50%

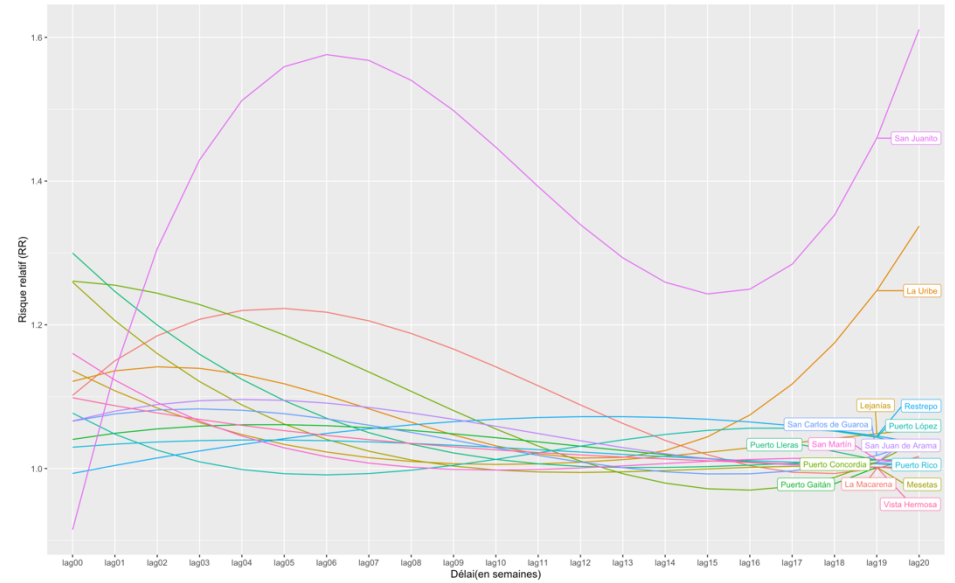
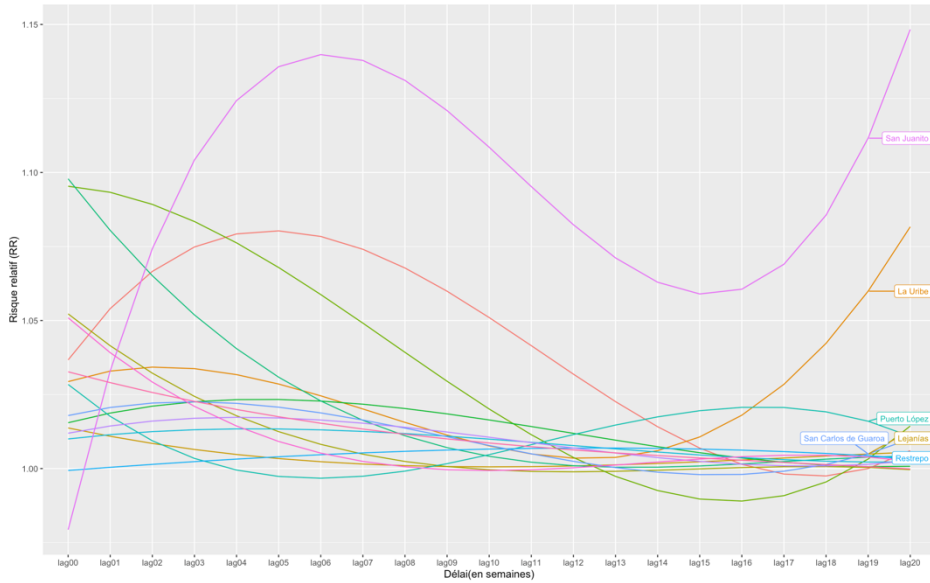
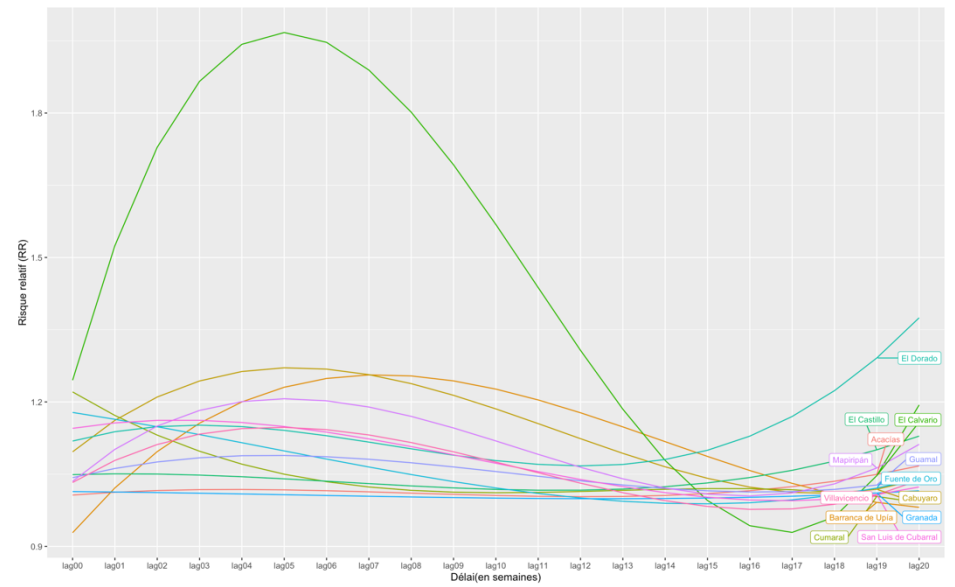


**Figure 39.** Graphique illustrant le risque relatif (RR) variant selon le décalage des valeurs de la covariable de **précipitations hebdomadaires moyennes** à un quantile de 10% (a) et de 50% (b).

(a) Quantile 75%



(b) Quantile 95%

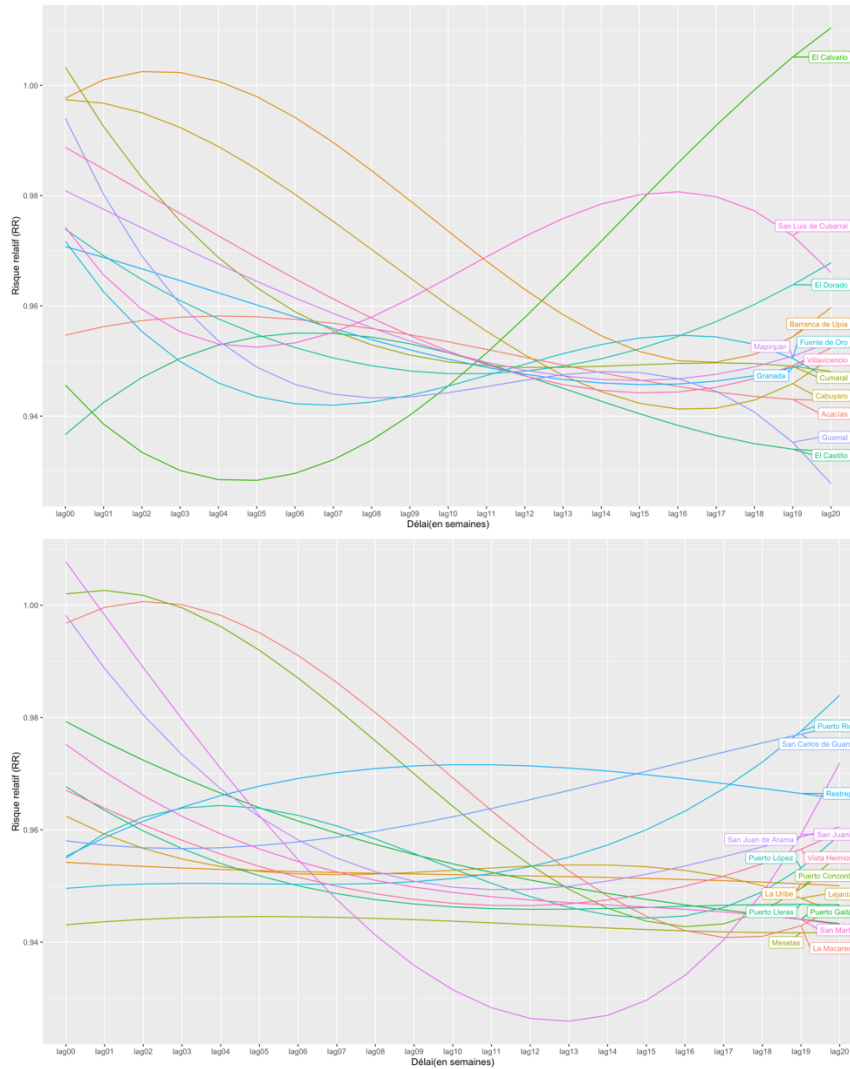


**Figure 40.** Graphique illustrant le risque relatif (RR) variant selon le décalage des valeurs de la covariable de précipitations hebdomadaires moyennes à un quantile de 75% (a) et de 95% (b).

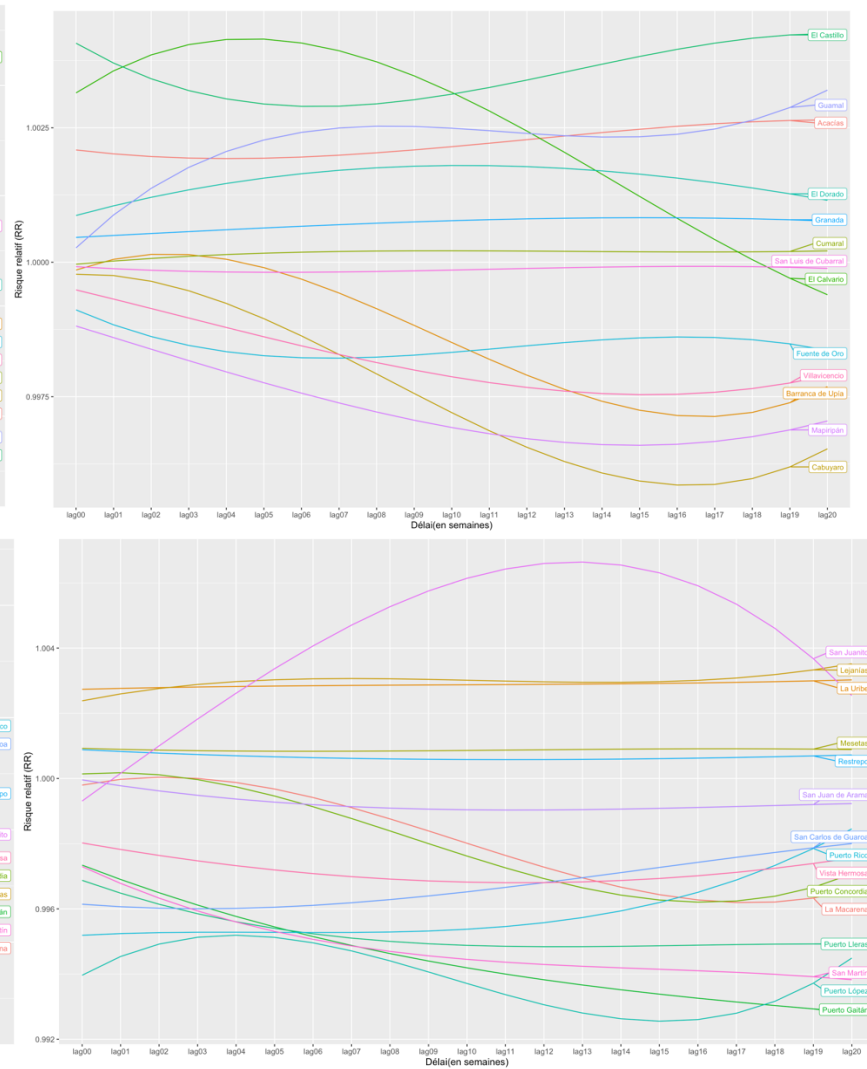
#### 4.2.2.2 Température ambiante moyenne hebdomadaire

La température ambiante présente des RR moins élevées et très variables à travers du département. À un quantile de 10% (figure 41a), la majorité des municipalités commencent avec des RR inférieurs à 1.00 assez élevés qui chutent au fur et à mesure que le décalage augmente. En d'autres mots, le risque de dengue le plus élevé à de basses valeurs (c.-à-d. Q10) de température ambiante est en temps réel (décalage = 0). Encore une fois, la courbe de San Juanito représente une exception en plus d'El Calvario. C'est d'ailleurs auprès de ces municipalités ou l'association la plus négative est témoignée (RR= 0.925 à 13 semaines de décalage et RR= 0.93 à 5 semaines de décalage) avec 7% (1-0.93) moins de chance de la maladie. Cependant, à plus de 18 semaines, le risque de la dengue est légèrement élevé à El Calvario pour un quantile de 10% (figure 41a) de la température ambiante. À la médiane (quantile 50%), les municipalités sont subdivisées en termes du type d'effet observé. Le RR maximal (RR = 1.005) est atteint à San Juanito à un décalage de 13 semaines. Quant au RR minimal (RR = 0.9919), il est témoigné à Puerto Lopez à un décalage de 15 semaines. Pour une bonne partie des municipalités, la courbe est constante indépendamment des décalages. Les autres municipalités sont subdivisées entre des courbes de RR décroissantes ou croissantes avec l'augmentation du décalage. Ensuite, les courbes des quantiles 75% (Q3) et 95% (figures 42a et 42b) diffèrent énormément d'une municipalité à l'autre. À ce point-ci, la majorité des sites présentent un risque accru (RR > 1.00) de dengue à l'exception de quelques-unes à des décalages de moins de 2 semaines. À un quantile de 95% (figure 42b), il n'existe pas un type de courbe unique de RR à travers de Méta. Pour la plupart, le RR croit avec l'augmentation du décalage. Puis à partir de la 13<sup>e</sup> semaine, la courbe décroît jusqu'à la 20<sup>e</sup> semaine.

(a) Quantile 10%

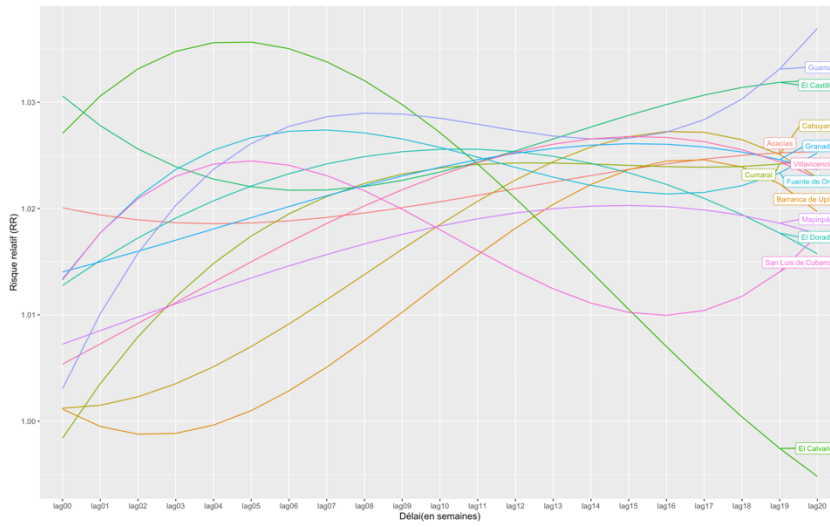


(b) Quantile 50%

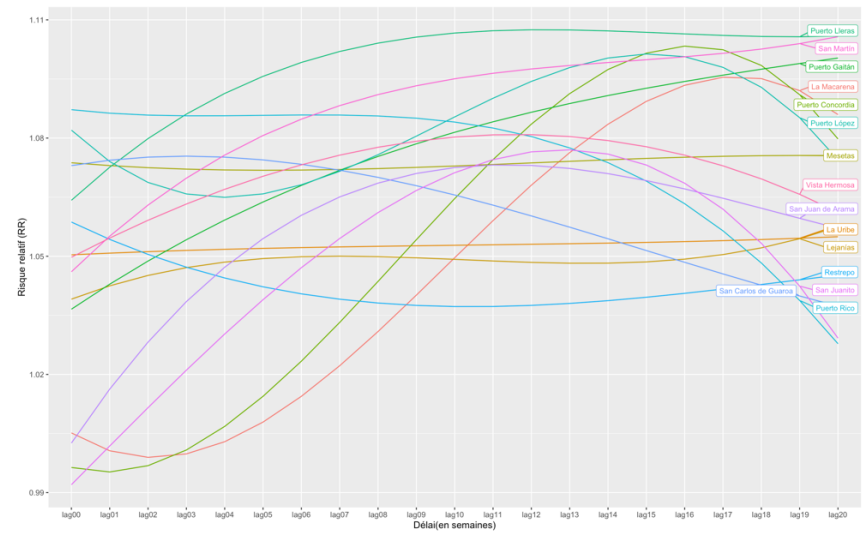
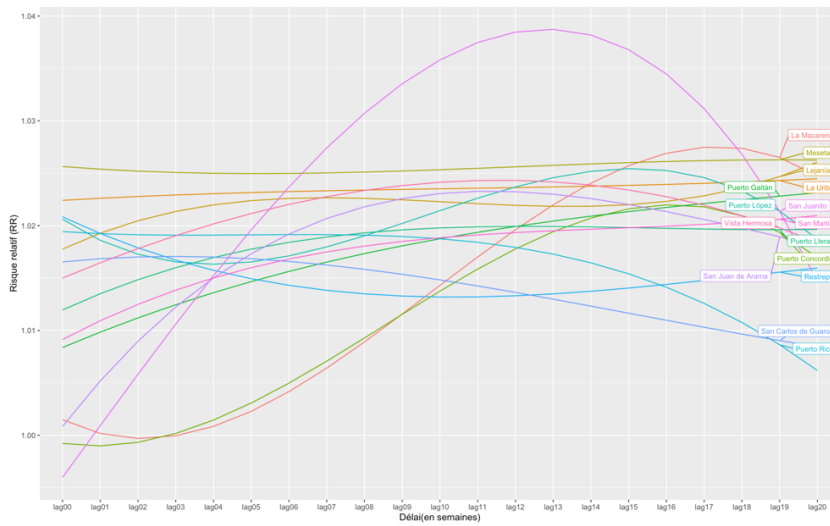
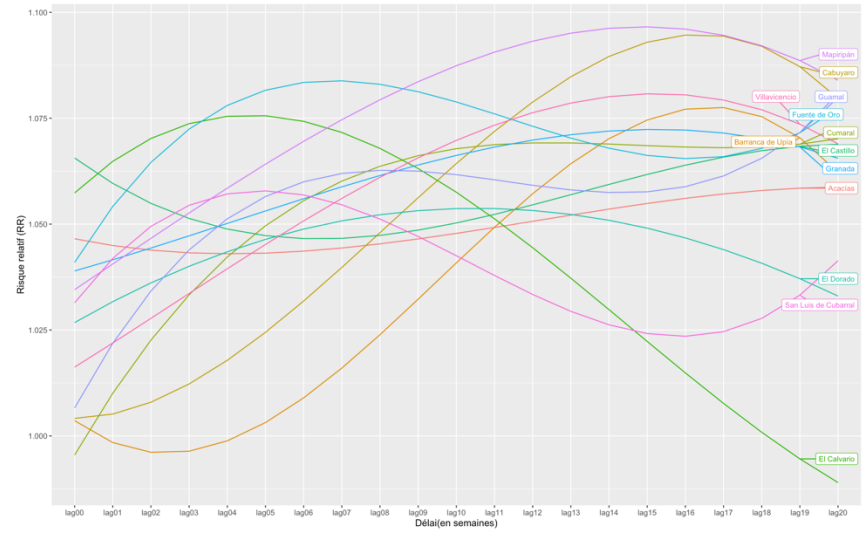


**Figure 41.** Graphique illustrant le risque relatif (RR) variant selon le décalage des valeurs de la covariable de température ambiante hebdomadaire moyenne à un quantile de 10% (a) et de 50% (b).

(a) Quantile 75%



(b) Quantile 95%



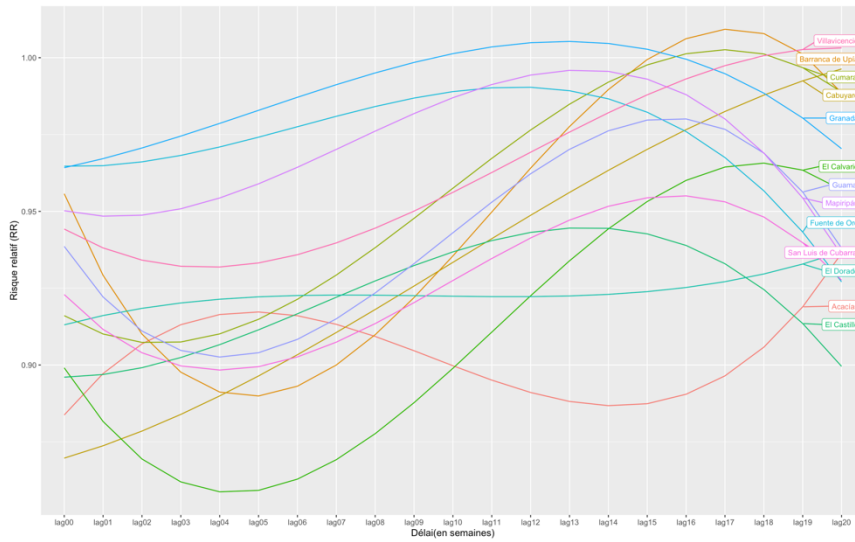
**Figure 42.** Graphique illustrant le risque relatif (RR) variant selon le décalage des valeurs de la covariable de température ambiante hebdomadaire moyenne à un quantile de 75% (a) et de 95% (b).



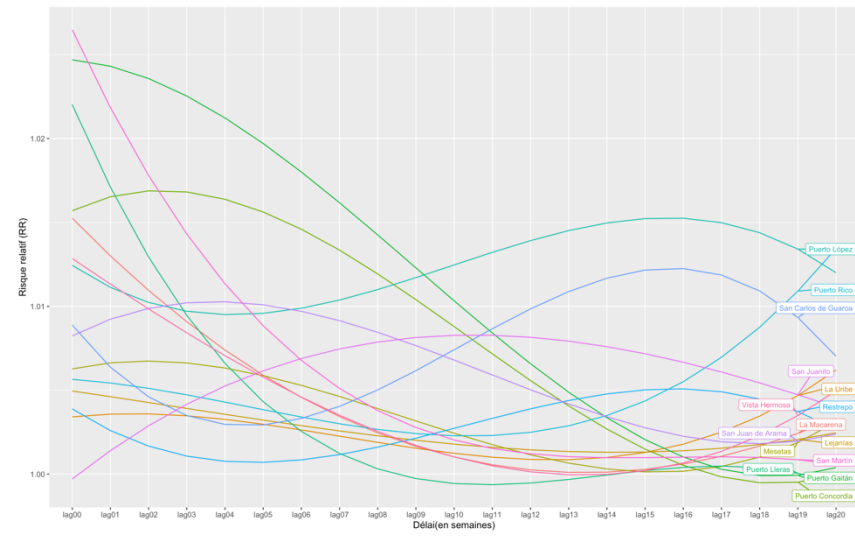
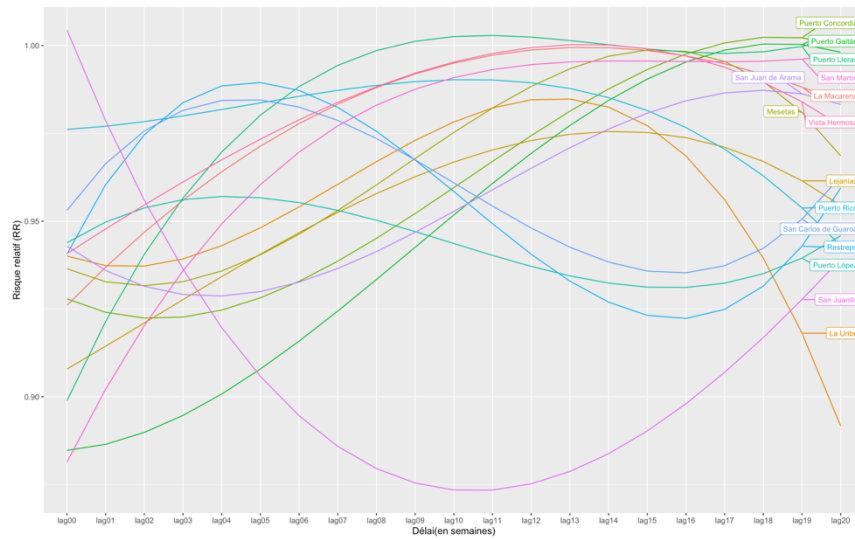
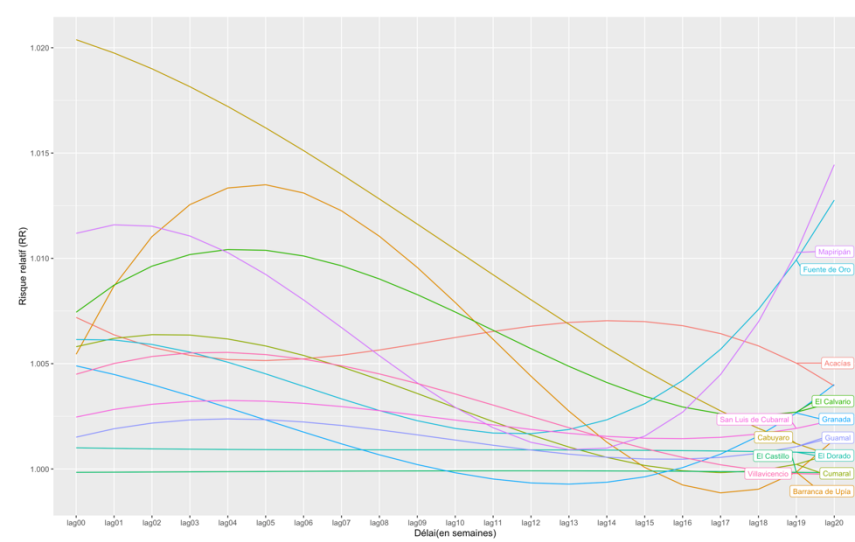
### 4.2.2.3 Température du point de rosée moyenne hebdomadaire

À de basses valeurs (quantile 10%), la TPR révèle un risque diminué pour la dengue puisque les RR se situent tous sur la borne inférieure à 1 (figure 43a). Encore une fois, San Juanito, Cabuyaro et El Calvario présentent les RR les plus minimales ( $RR \approx 0.858$ ). Pour la majorité, la courbe des RR croît jusqu'à un décalage de plus de 12 semaines et se termine par une décroissance lorsqu'elle tend vers un décalage de 20 semaines. Le RR maximal est atteint pour la plupart entre la 15<sup>e</sup> et 18<sup>e</sup> semaine de décalage. À un quantile de 50% (figure 43b), les RR associés à la TPR se retrouvent déjà sur la borne supérieure à 1. Sur le plan de la progression de la courbe, une grande partie des sites voit une décroissance du RR avec l'avancement du décalage pour finir avec une courbe croissante moyenne, tandis qu'une minorité témoigne de courbes finissant en décroissance. À la médiane, le RR le plus élevé pour la dengue est à Puerto Lleras ( $RR = 1.021$ ), San Martin ( $RR = 1.026$ ) et Puerto Gaitan ( $RR = 1.023$ ) en temps réel (décalage de zéro). À des quantiles de 75% (figure 44a) et 95% (figure 44b), San Juanito se démarque une fois de plus avec des valeurs complètement opposées au reste du département. Le RR maximal est perçu à El Calvario ( $RR = 1.087$  pour Q75 et  $RR = 1.151$  pour Q95 à 4 semaines de décalage) suivi de San Juanito ( $RR = 1.074$  pour Q75 et  $RR = 1.133$  pour Q95 à 11 semaines de décalage) pour ces deux quantiles. San Juanito se distingue d'ailleurs avec une courbe de forme parabolique. Les courbes des municipalités à ces deux quantiles sont dans l'ensemble croissantes jusqu'à un décalage d'environ 5 semaines et se poursuivent par une décroissance jusqu'à un décalage d'environ 15 semaines. La courbe se termine par une croissance qui, dans quelques cas, atteint le point maximal du RR de la municipalité. D'autres municipalités voient une progression différente avec un début décroissant jusqu'à environ 4-5 semaines de décalage et s'enchaînent avec une courbe croissante qui rejoint le pic à la 15-18<sup>e</sup> semaine de décalage. En somme, le RR maximal de dengue pour la TPR à des valeurs élevées se situe entre 4-5<sup>e</sup> ou 15-18<sup>e</sup> semaine de décalage.

(a) Quantile 10%

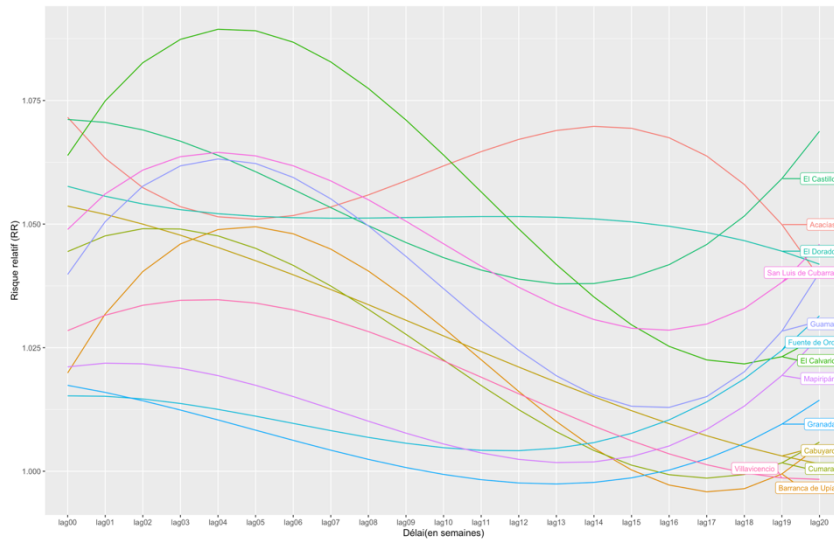


(b) Quantile 50%

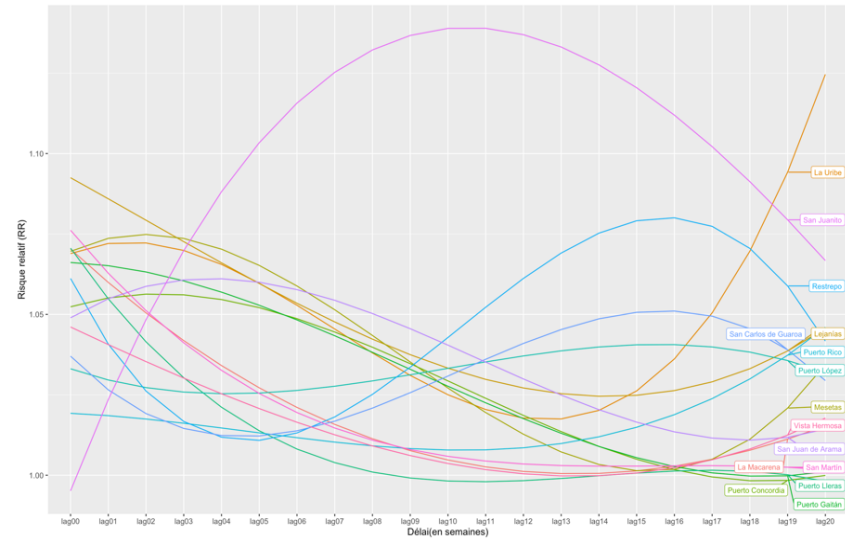
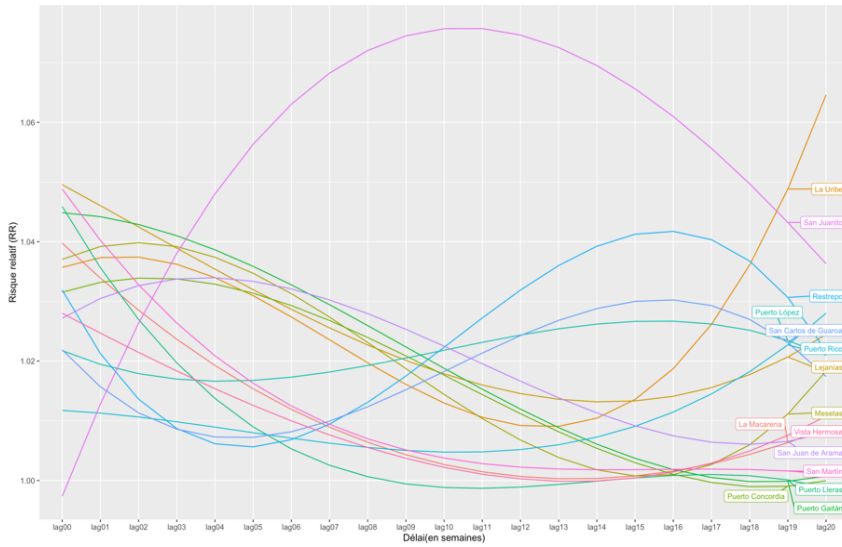
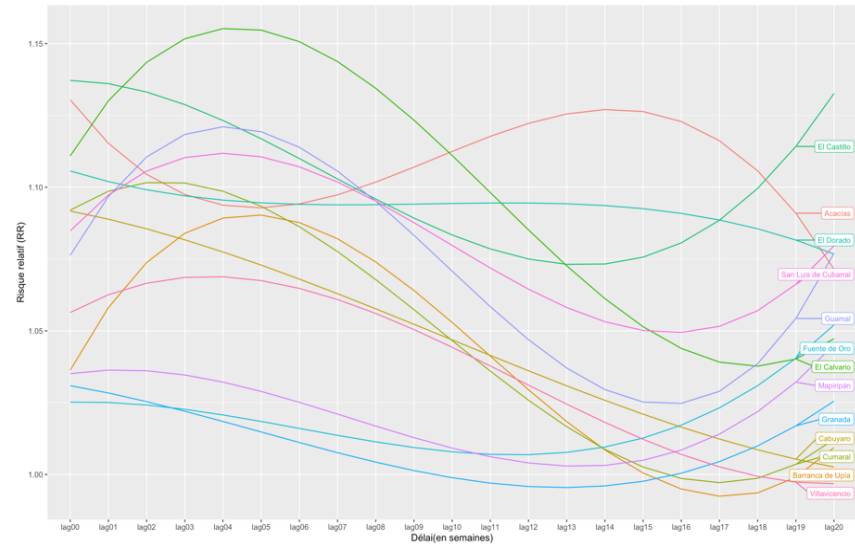


**Figure 43.** Graphique illustrant le risque relatif (RR) variant selon le décalage des valeurs de la covariable de la température du point de rosée hebdomadaire moyenne à un quantile de 10% (a) et de 50% (b).

(a) Quantile 75%



(b) Quantile 95%

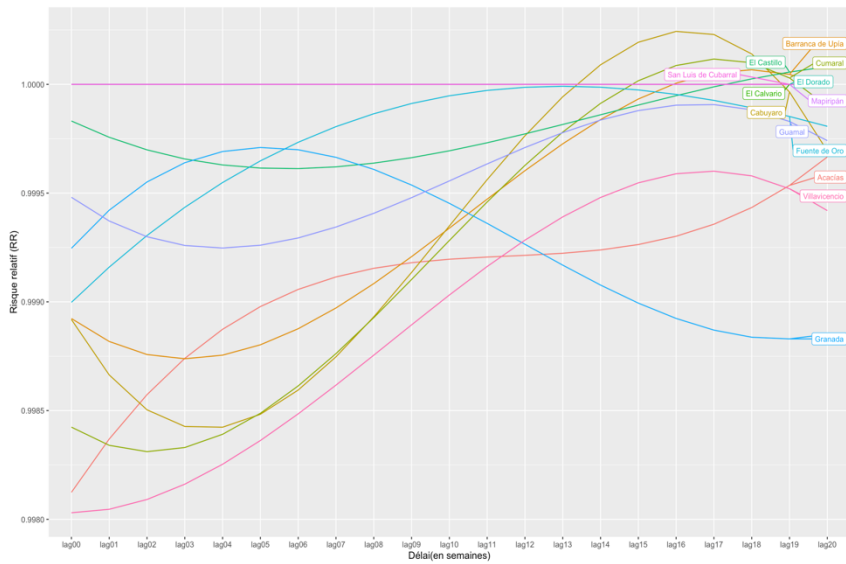


**Figure 44.** Graphique illustrant le risque relatif (RR) variant selon le décalage des valeurs de la covariable de la température du point de rosée hebdomadaire moyenne à un quantile de 75% (a) et de 95% (b).

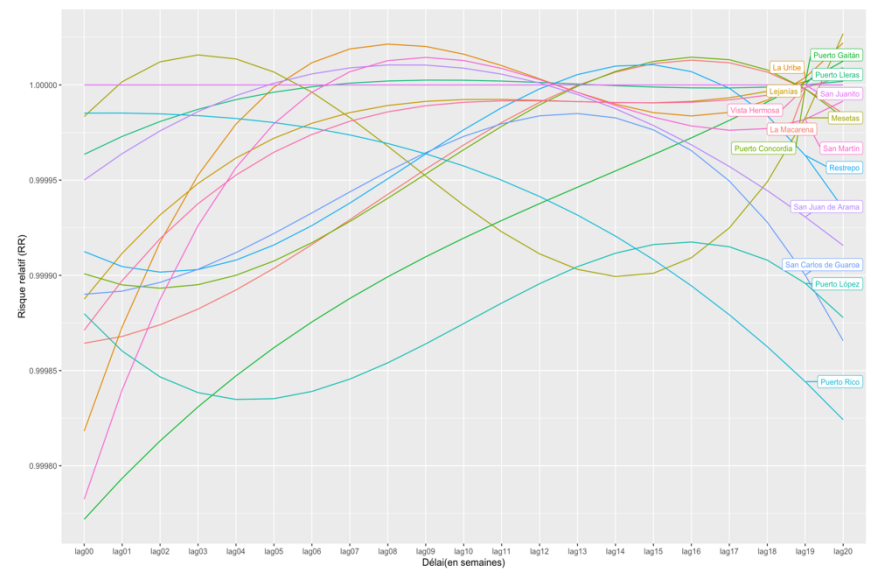
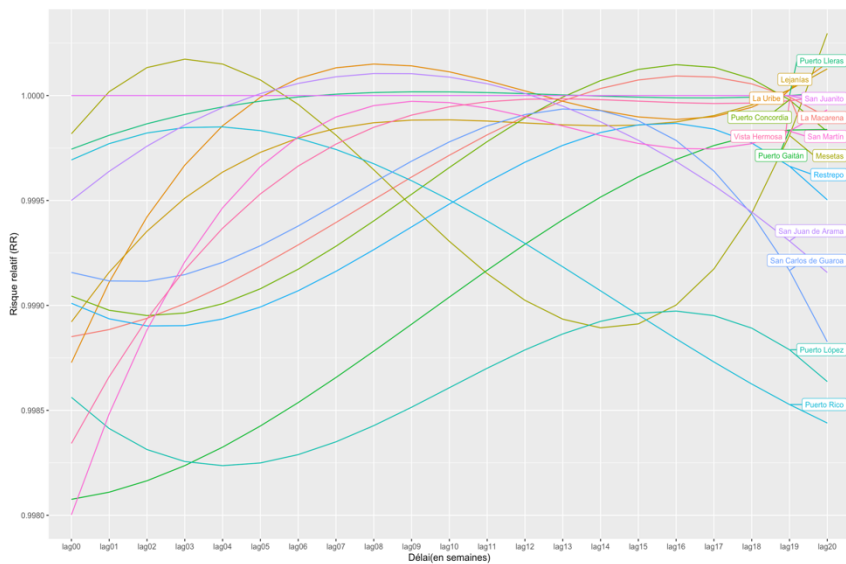
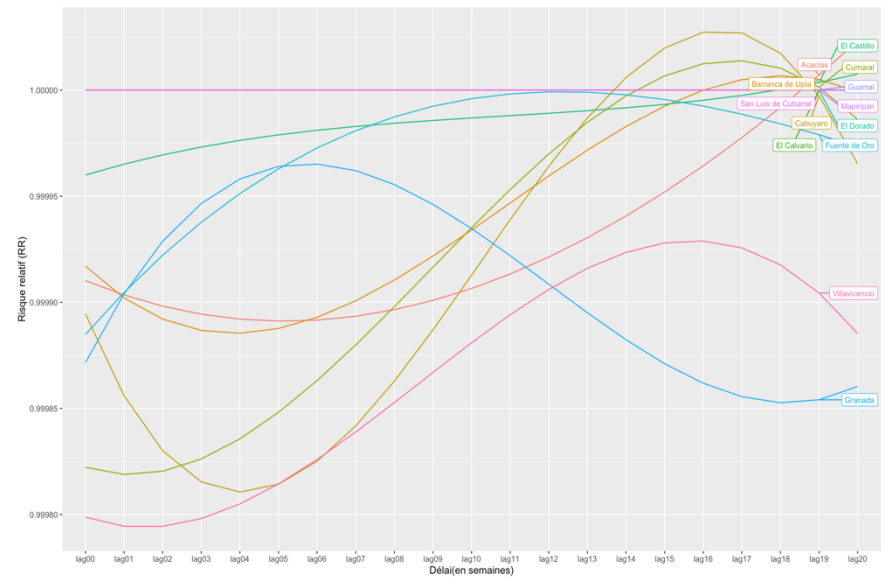
#### **4.2.2.4 Pression hebdomadaire moyenne au niveau de la mer**

Enfin, la pression présente les RR les plus minimes des covariables d'intérêt. En comparant les graphiques des quantiles de 10% et 50% (figures 45a et 45b) à ceux de 75% et 95% (figures 46a et 46b), nous observons une transition des valeurs de la borne inférieure à la borne supérieure à 1 avec quelques exceptions qui excèdent ces marges.

(b) Quantile 10%



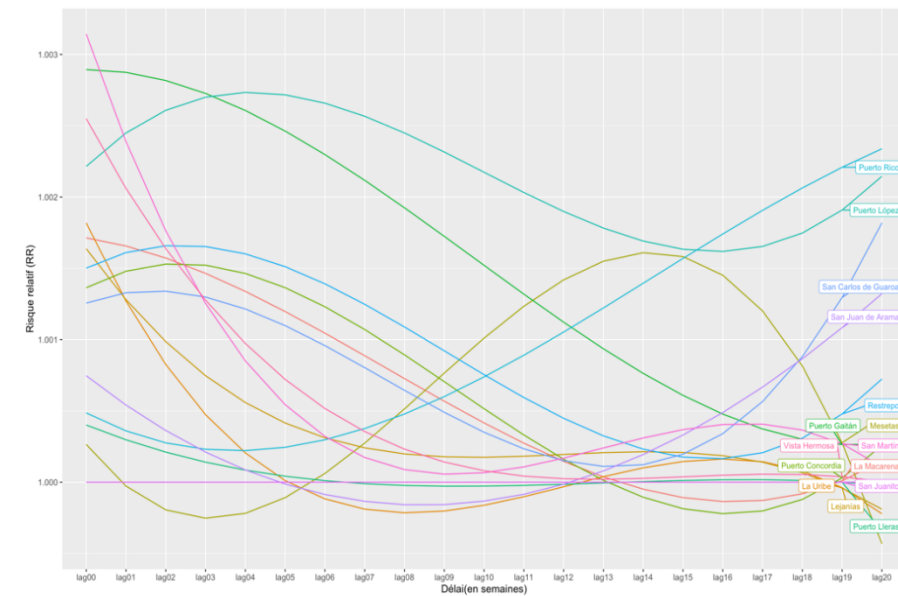
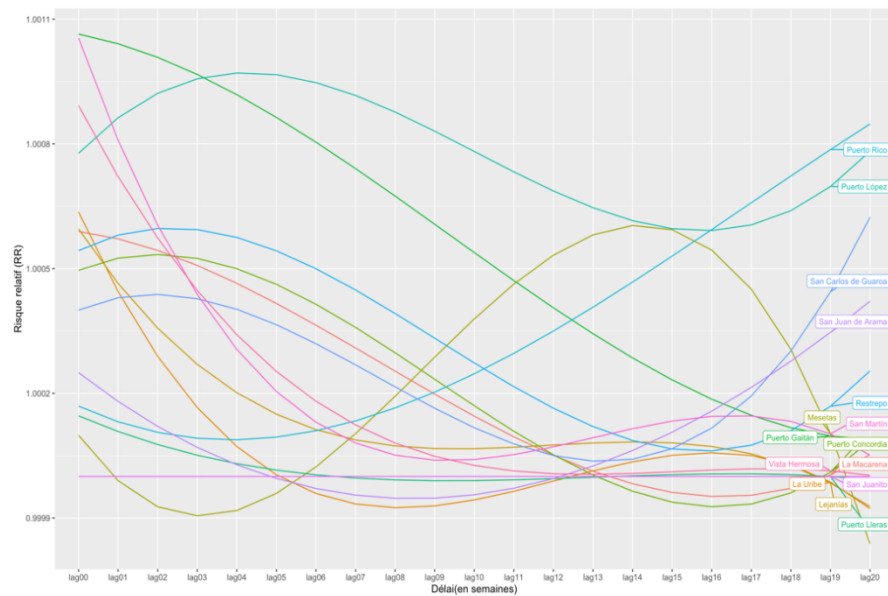
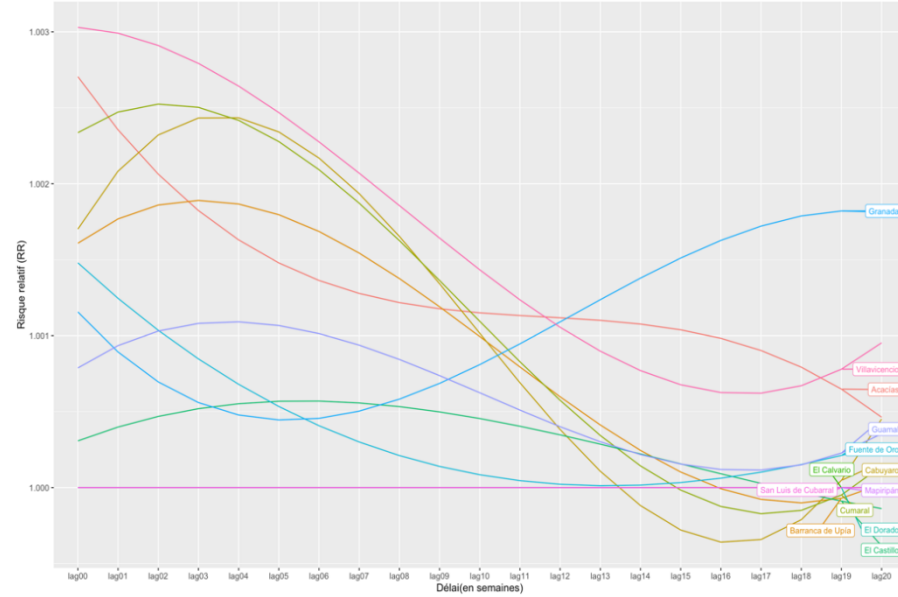
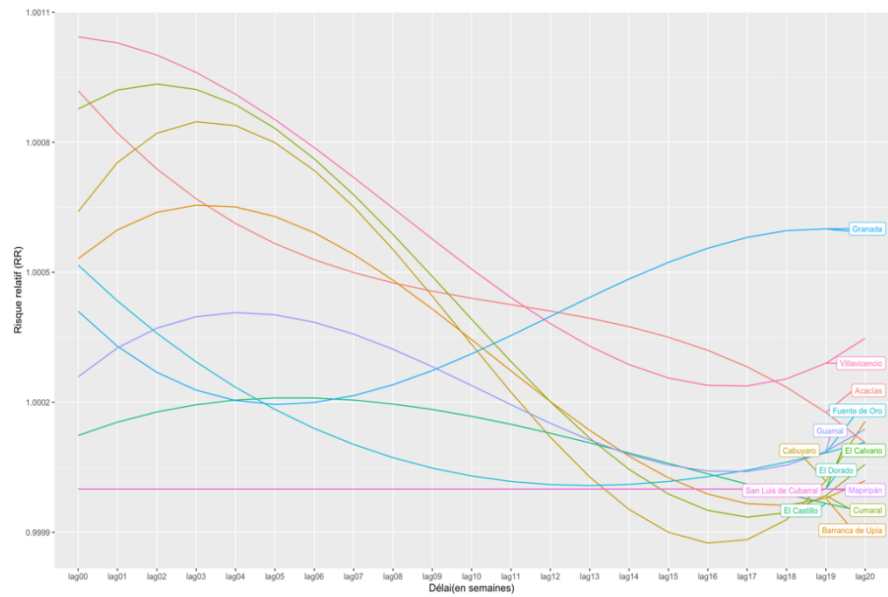
(b) Quantile 50%



**Figure 45.** Graphique illustrant le risque relatif (RR) variant selon le décalage des valeurs de la covariable de la pression au niveau de la mer hebdomadaire moyenne à un quantile de 10% (a) et de 50% (b).

(a) Quantile 75%

(b) Quantile 95%



**Figure 46.** Graphique illustrant le risque relatif (RR) variant selon le décalage des valeurs de la covariable de la pression au niveau de la mer hebdomadaire moyenne à un quantile de 75% (a) et de 95% (b).

En somme, uniformément pour toutes les covariables, les RR associés à la dengue étaient inférieures à 1 pour la majorité des municipalités à de faibles valeurs (quantile de 10%) de la covariable en question. L'inverse s'applique aussi (quantile de 95%). Les municipalités d'El Calvario et San Juanito se démarquent quant aux RR de la dengue liés aux précipitations, à la température ambiante de l'air et la température du point de rosée.

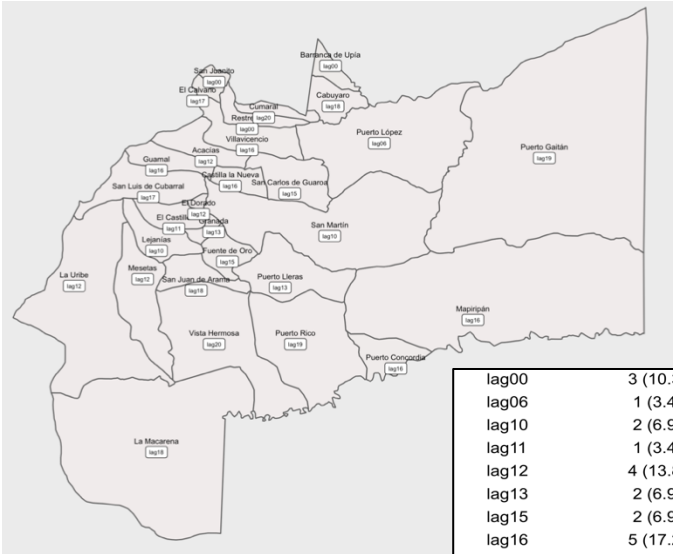
### **4.2.3 Analyses du risque par carte géographique**

Les cartes géographiques suivantes (figures 47 à 53) illustrent les quantiles 10%, 50%, 75% et 95% pour le RR maximal et minimal de chaque municipalité ainsi que les décalages qui leur sont associés. Un tableau sommaire de la fréquence des décalages au sein du département est également présenté.

#### **4.2.3.1 Précipitations moyennes hebdomadaires**

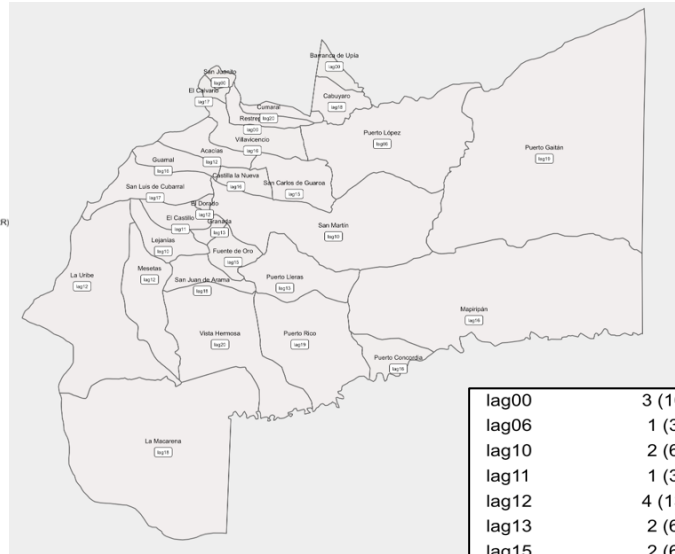
D'abord, les précipitations hebdomadaires moyennes ne démontrent d'effet important à un quantile de 10% ou 50% pour les RR maximaux (figures 47a et 47b). À 75% (figure 47c), la grande majorité des municipalités voient une augmentation du RR maximal posant un risque accru pour la dengue. Comme attendu, à un quantile de 95% (figure 47d), le RR maximal est accentué au sein de la majorité des municipalités. À El Calvario, il semble y avoir le RR le plus important à travers du département à un délai de 5 semaines (RR= 1.97). Aucune dépendance géographique particulière n'apparaît pour cette covariable. Les RR maximaux sont majoritairement atteints à un délai de 0 semaine, c'est-à-dire en temps réel, suivi d'un délai de 5 semaines pour les quantiles de 75% et 95%. Puis, aucun RR minimal ne se retrouve sur la borne d'un risque accru (RR > 1.00) (figures 48a à 48d). Toutefois, les RR inférieurs à 1 sont amplifiés à un quantile de 10% (figure 48a), avec, encore une fois, El Calvario comme la municipalité reflétant la plus minimale à travers du département à un délai de 5 semaines (RR= 0.44). Contrairement à ce qui est témoigné au sein d'autres séries de cartes géographiques, le RR n'augmente pas avec l'augmentation du quantile dans ce cas-ci.

Quantile 10%



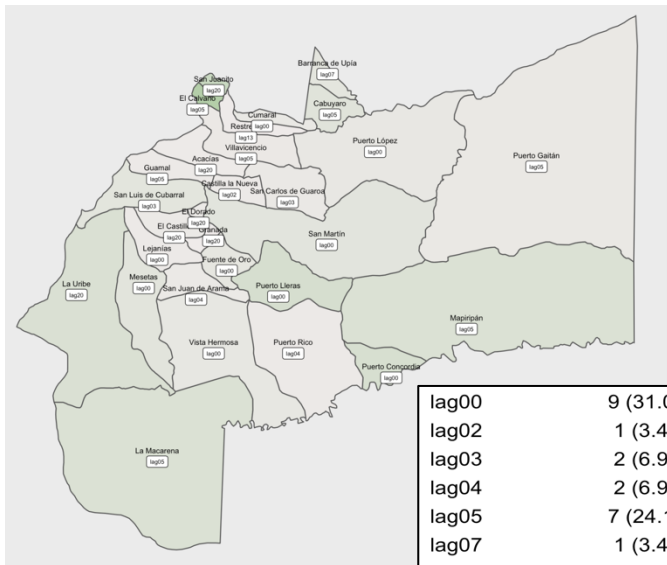
lag00	3 (10.3%)
lag06	1 (3.4%)
lag10	2 (6.9%)
lag11	1 (3.4%)
lag12	4 (13.8%)
lag13	2 (6.9%)
lag15	2 (6.9%)
lag16	5 (17.2%)
lag17	2 (6.9%)
lag18	3 (10.3%)
lag19	1 (3.4%)
lag20	3 (10.3%)

Quantile 50%



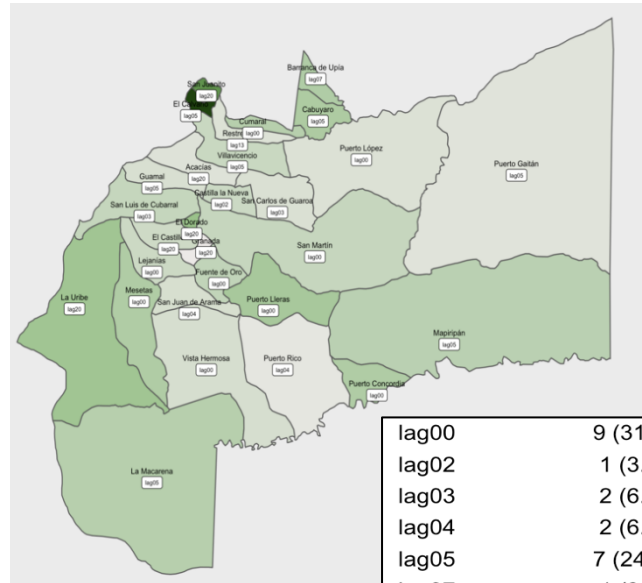
lag00	3 (10.3%)
lag06	1 (3.4%)
lag10	2 (6.9%)
lag11	1 (3.4%)
lag12	4 (13.8%)
lag13	2 (6.9%)
lag15	2 (6.9%)
lag16	5 (17.2%)
lag17	2 (6.9%)
lag18	3 (10.3%)
lag19	2 (6.9%)
lag20	2 (6.9%)

Quantile 75%



lag00	9 (31.0%)
lag02	1 (3.4%)
lag03	2 (6.9%)
lag04	2 (6.9%)
lag05	7 (24.1%)
lag07	1 (3.4%)
lag13	1 (3.4%)
lag20	6 (20.7%)

Quantile 95%



lag00	9 (31.0%)
lag02	1 (3.4%)
lag03	2 (6.9%)
lag04	2 (6.9%)
lag05	7 (24.1%)
lag07	1 (3.4%)
lag13	1 (3.4%)
lag20	6 (20.7%)

**Figure 47.** Carte géographique de Méta illustrant le **risque relatif (RR) maximal** avec le décalage où celui-ci est atteint pour les **précipitations hebdomadaires moyennes** à un quantile de 10% (a), 50% (b), 75% (c) et 95% (d). Un tableau de densité des décalages est présenté dans le coin inférieur droit de la figure avec un compte et pourcentage des municipalités avec lesquels le décalage s'associe.

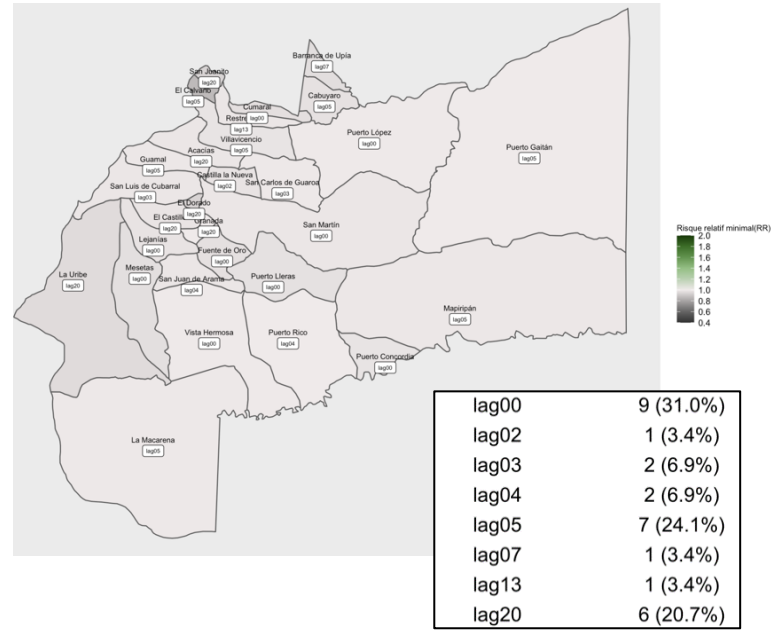
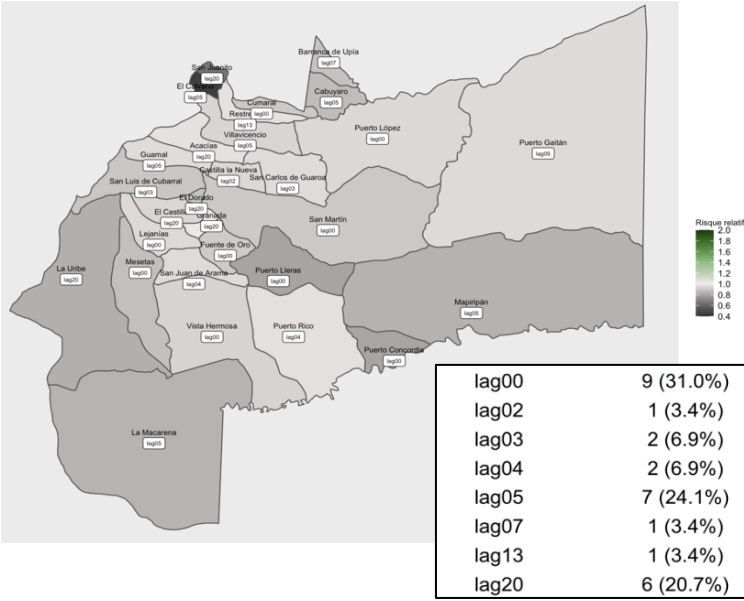


Quantile 10%

Quantile 50%

(a)

(b)

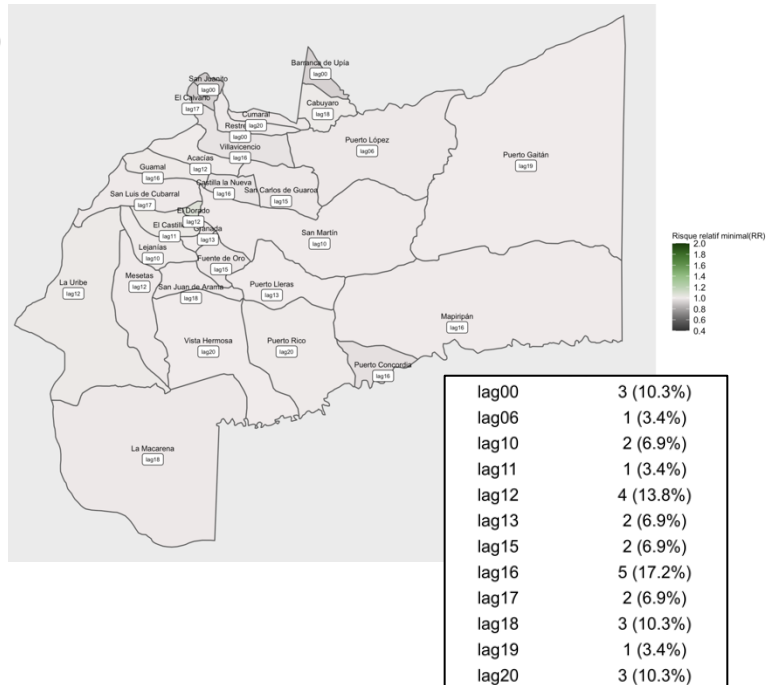
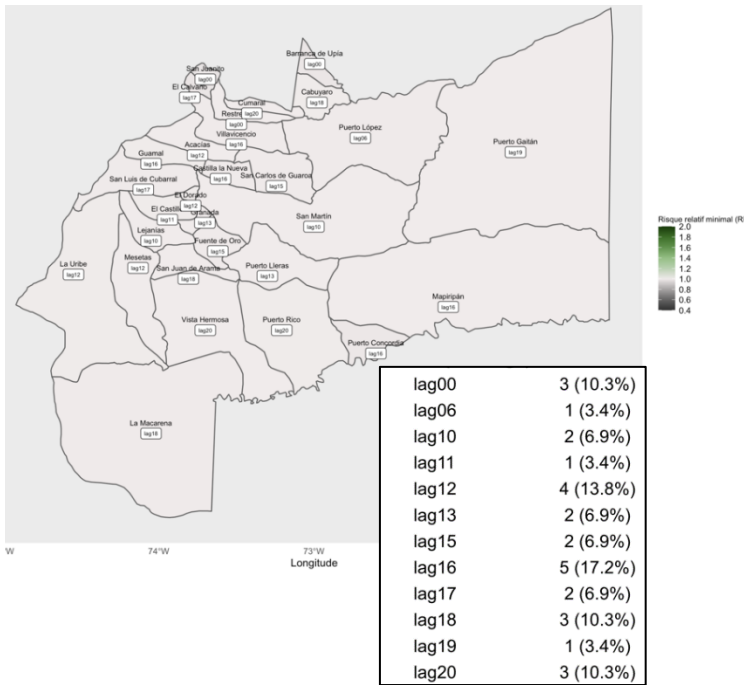


Quantile 75%

Quantile 95%

(c)

(d)

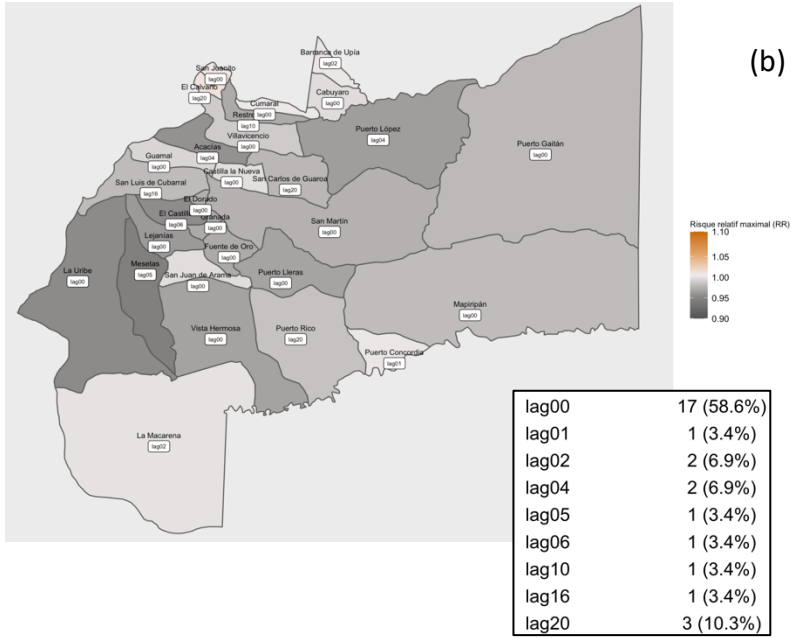


**Figure 48.** Carte géographique de Méta illustrant le **risque relatif (RR) minimal** avec le décalage où celui-ci est atteint pour les **précipitations hebdomadaires moyennes** à un quantile de 10% (a), 50% (b), 75% (c) et 95% (d). Un tableau de densité des décalages est présenté dans le coin inférieur droit de la figure avec un compte et pourcentage des municipalités avec lesquels le décalage s'associe.

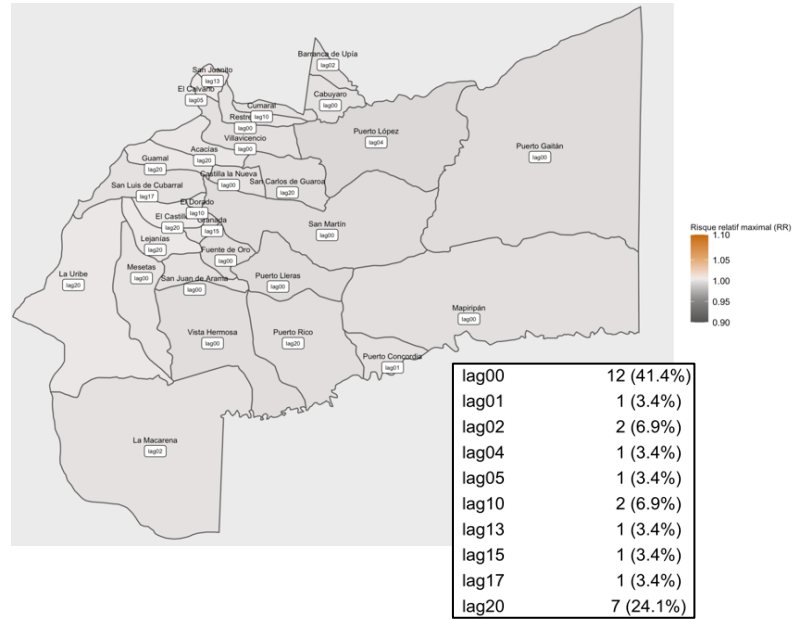
#### 4.2.3.2 Température ambiante moyenne hebdomadaire

La température ambiante hebdomadaire moyenne présente un effet sur la dengue. Que ce soit au niveau des RR minimaux ou maximaux, nous observons une augmentation du RR avec l'augmentation du quantile pris en considération. À un quantile de 10% pour les RR maximaux (figure 49a), nous témoignons qu'ils se trouvent sur la borne inférieure à 1 dans l'ensemble, diminuant et transitionnant vers un effet nul à un quantile de 50% (figure 49b). Un risque accru d'incidence de la maladie apparaît à un quantile de 75% (figure 49c) et s'accroît à un quantile de 95% (figure 49d). Aucune dépendance géographique n'est particulièrement remarquée dans ce cas avec l'exception de RR légèrement plus faibles à l'ouest à un quantile de 95%. Le décalage où cette valeur est atteinte pour ces deux quantiles (75% et 95%) est majoritairement à 20 semaines. Un RR inférieur à 1 est aperçu uniformément à un quantile de 10% pour les RR minimaux (figure 50a). À la médiane (figure 50b), on témoigne de RR davantage autour de la valeur de 1.00. À un quantile de 75% et 95% (figure 50c et 50d), le risque accru d'incidence de la dengue lié à la température ambiante hebdomadaire moyenne commence à être perçu à travers Méta avec une majorité des valeurs atteinte en temps réel (c.-à-d. décalage de zéro).

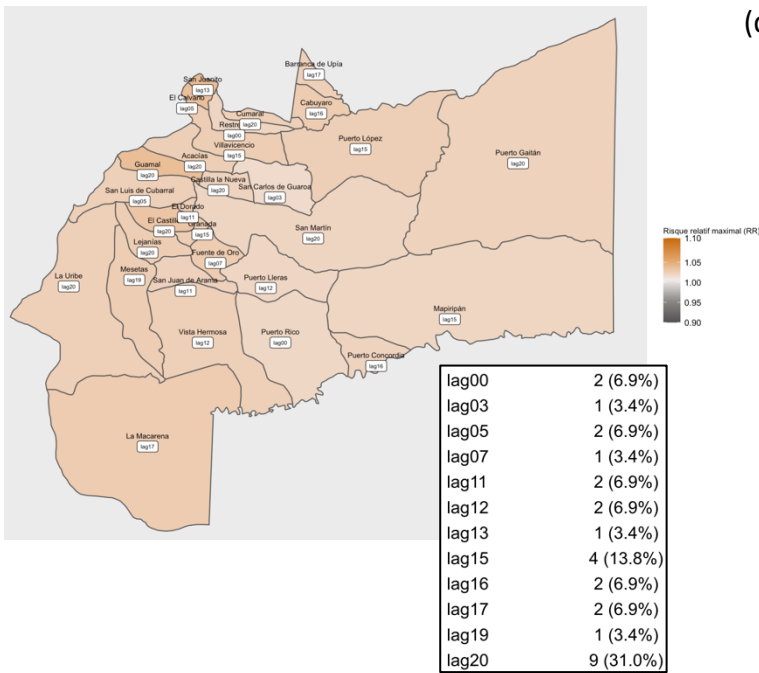
Quantile 10%



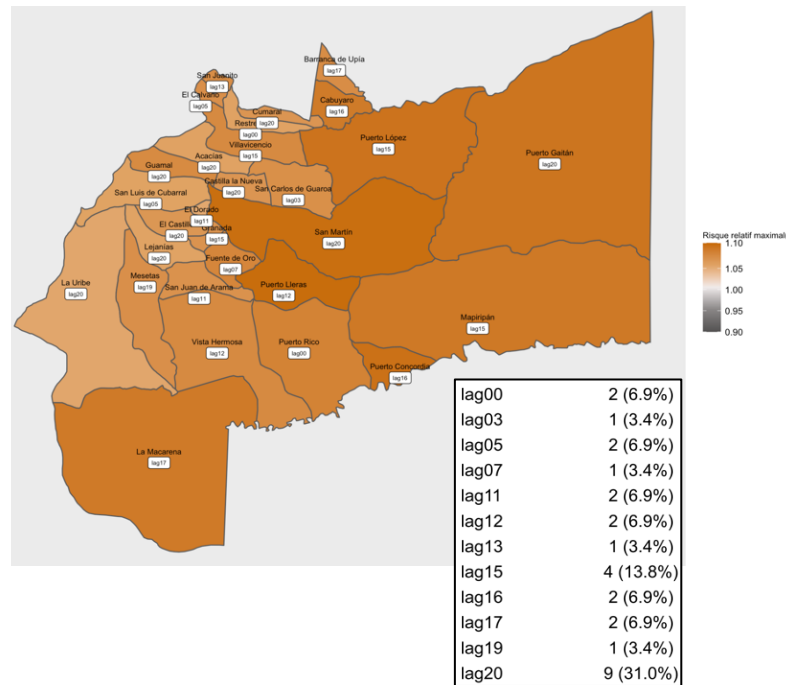
Quantile 50%



Quantile 75%



Quantile 95%



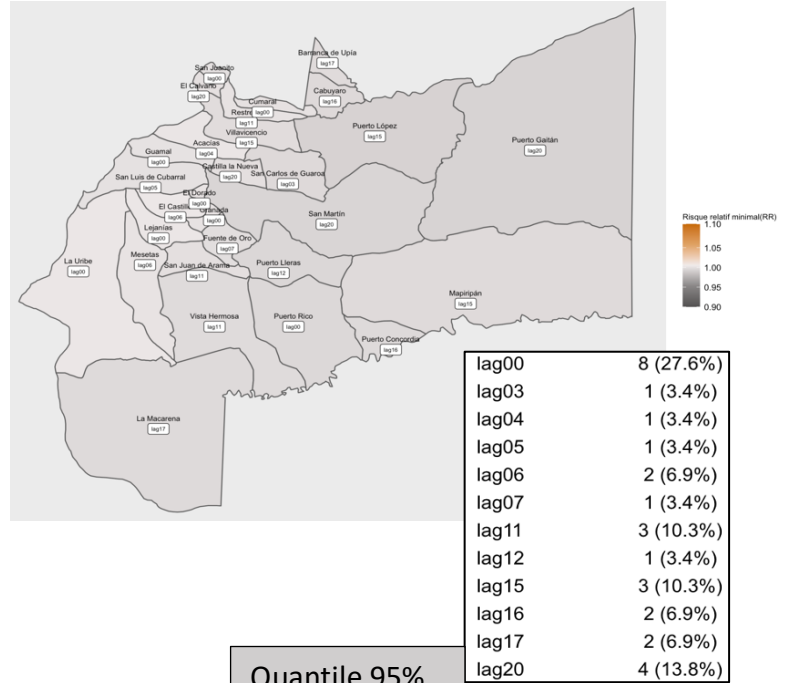
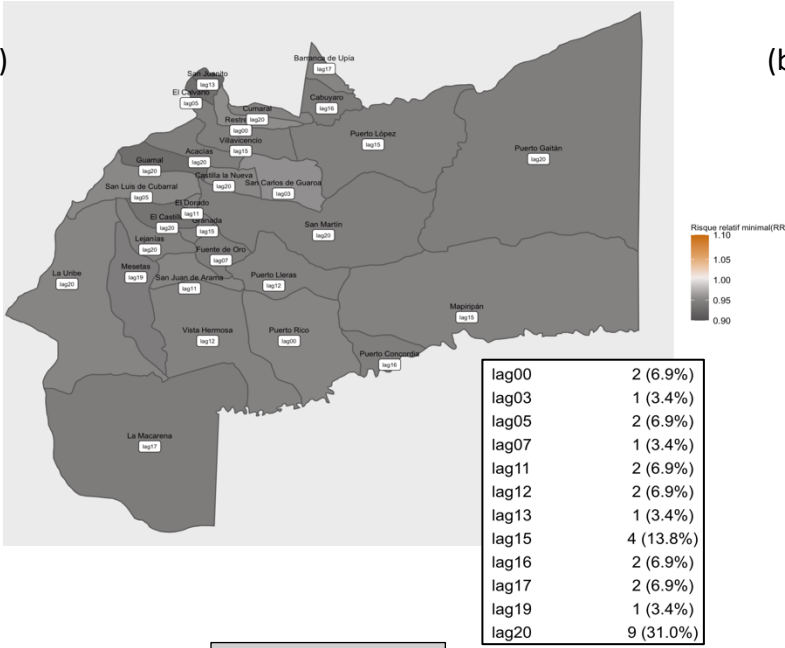
**Figure 49.** Carte géographique de Méta illustrant le **risque relatif (RR) maximal** avec le décalage où celui-ci est atteint pour les **températures ambiantes hebdomadaires moyennes** à un quantile de 10% (a), 50% (b), 75% (c) et 95% (d). Un tableau de densité des décalages est présenté dans le coin inférieur droit de la figure avec un compte et pourcentage des municipalités avec lesquels le décalage s'associe.

Quantile 10%

Quantile 50%

(a)

(b)

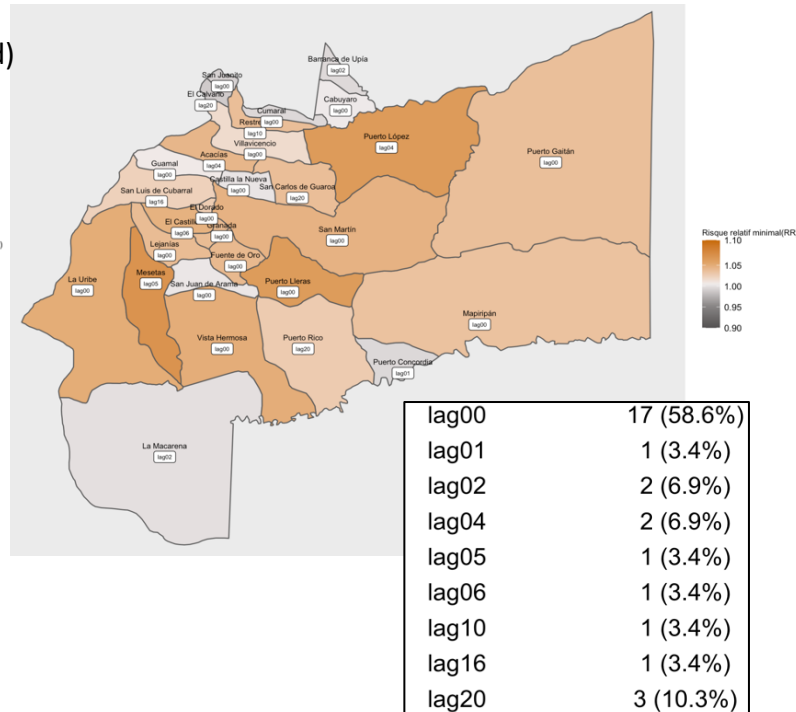
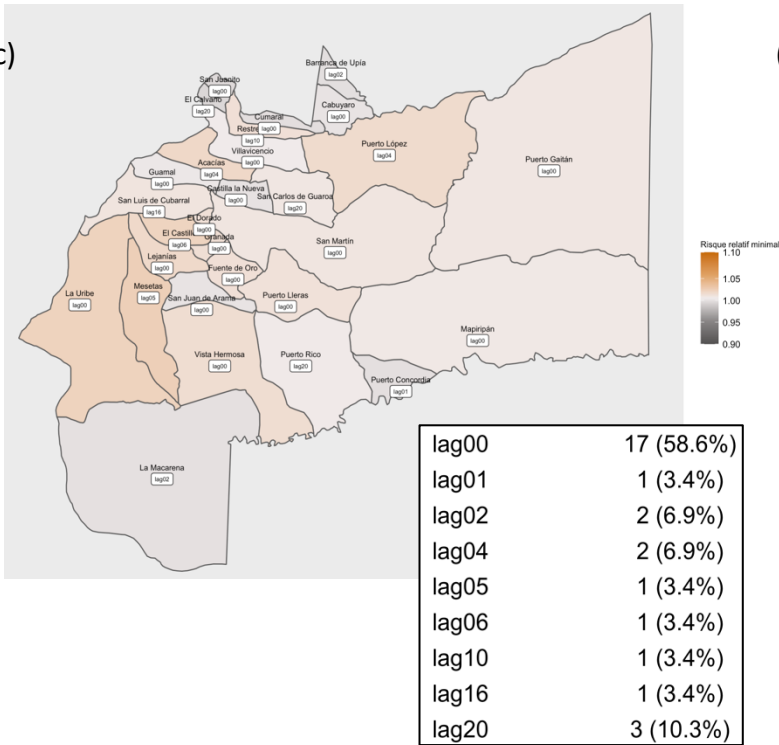


Quantile 75%

Quantile 95%

(c)

(d)



**Figure 50.** Carte géographique de Méta illustrant le **risque relatif (RR) minimal** avec le décalage où celui-ci est atteint pour les **températures ambiantes hebdomadaires** moyennes à un quantile de 10% (a), 50% (b), 75% (c) et 95% (d). Un tableau de densité des décalages est présenté dans le coin inférieur droit de la figure avec un compte et pourcentage des municipalités avec lesquels le décalage s'associe.

#### **4.2.3.3 Température du point de rosée moyenne hebdomadaire**

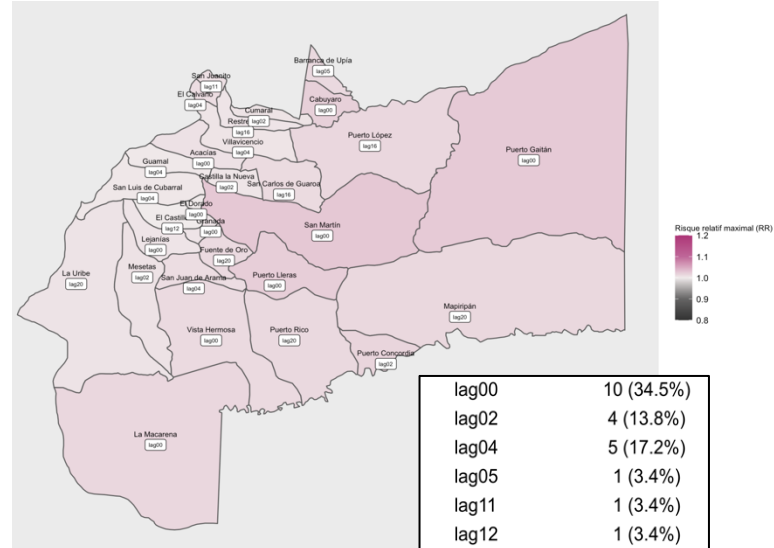
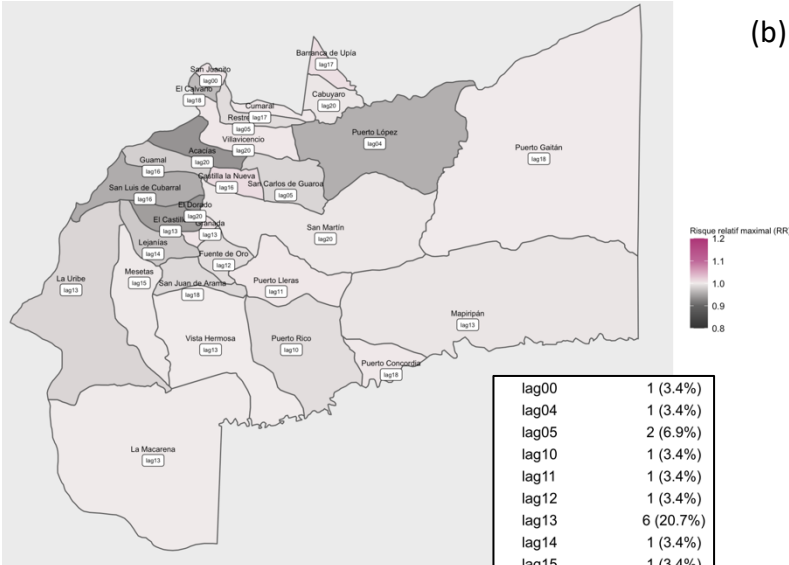
Puis, à de basses valeurs (quantile de 10%) (figure 51a), la TPR maximale présente en grande partie des RR tournant autour de 1 ou inférieurs pour l'ensemble. Nous observons une augmentation du RR maximal avec l'augmentation du quantile vers 95%. Pour les quantiles 50% (figure 51b), 75% (figure 51c) et 95% (figure 51d), le RR maximal atteint son pic majoritairement en temps réel (décalage = 0). À un quantile de 95% (figure 51d), une dépendance géographique existe à l'ouest du département avec des RR relativement élevés. Aucune municipalité ne démontre de RR inférieurs ou égaux à 1 à des quantiles supérieurs à 10%. Puis, les valeurs des RR minimaux pour cette même covariable reflètent à Q10% (figure 52a) des valeurs inférieures à 1. Nous voyons que la dépendance géographique existante à l'ouest du département réapparaît pour les cartes de 75% (figure 52c) et 95% (figure 52d). Pour ces mêmes quantiles, 13 semaines semblent être le délai idéal pour parvenir au RR minimal.

Quantile 10%

Quantile 50%

(a)

(b)

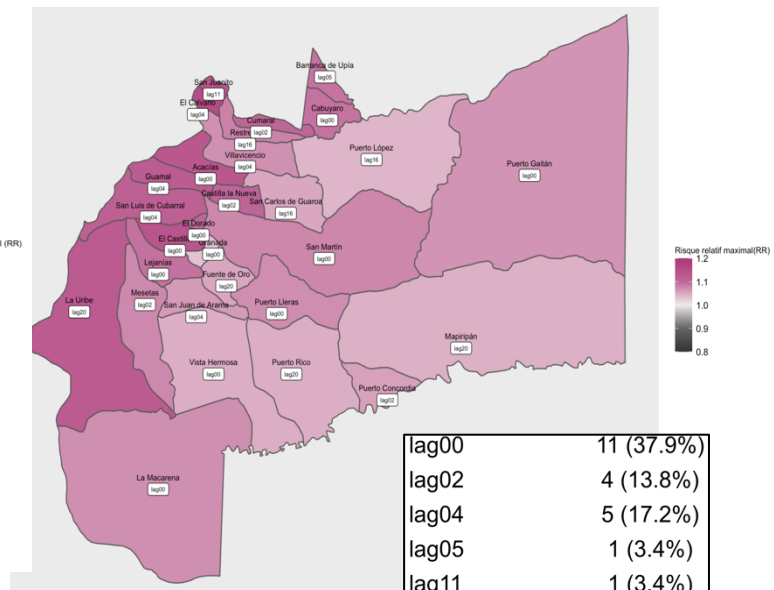
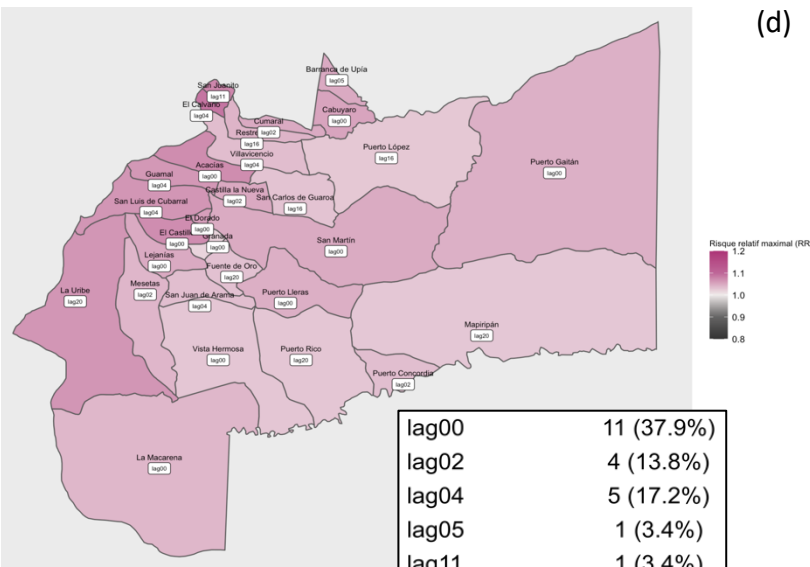


Quantile 75%

Quantile 95%

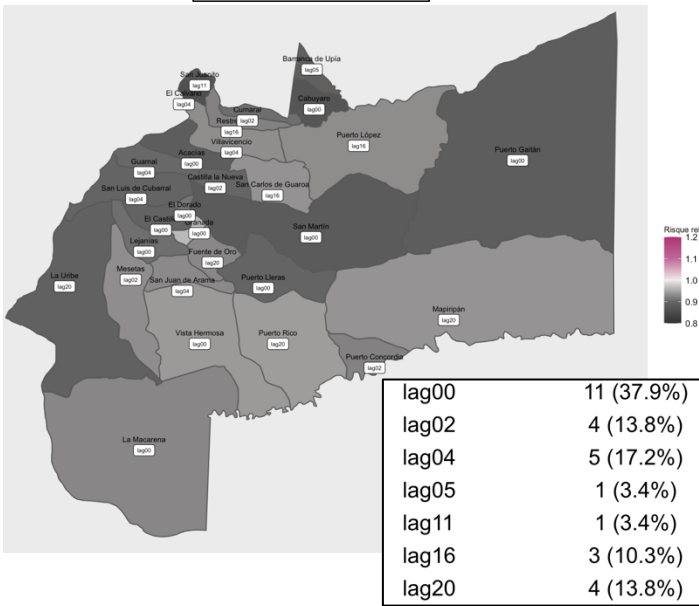
(c)

(d)

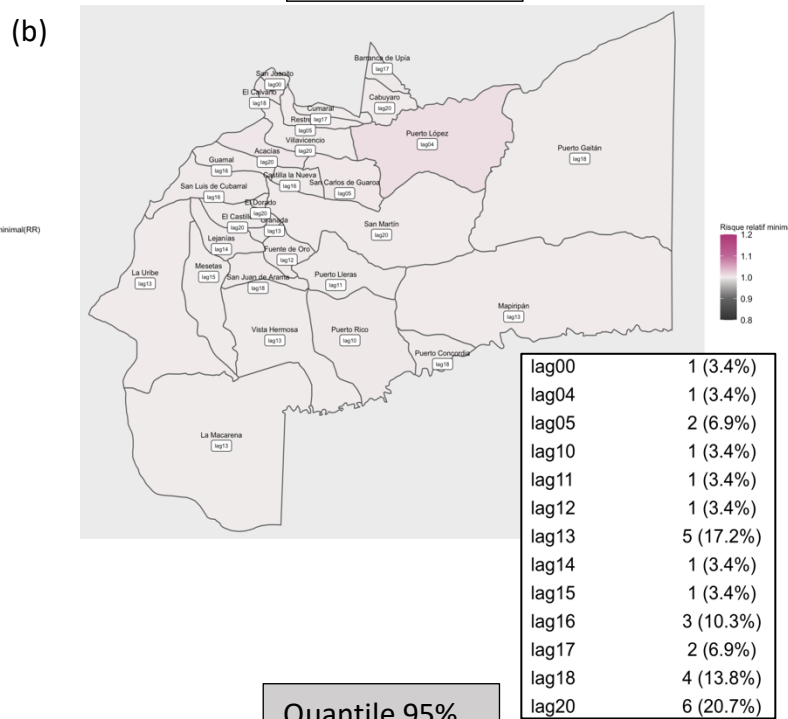


**Figure 51.** Carte géographique de Méta illustrant le **risque relatif (RR) maximal** avec le décalage où celui-ci est atteint pour la **température du point de rosée hebdomadaire moyenne** à un quantile de 10% (a), 50% (b), 75% (c) et 95% (d). Un tableau de densité des décalages est présenté dans le coin inférieur droit de la figure avec un compte et pourcentage des municipalités avec lesquels le décalage s'associe.

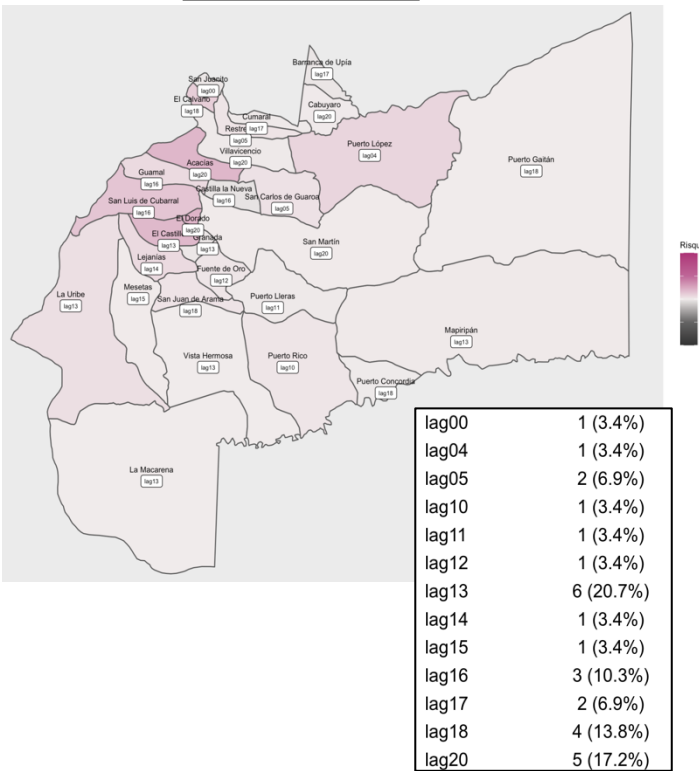
Quantile 10%



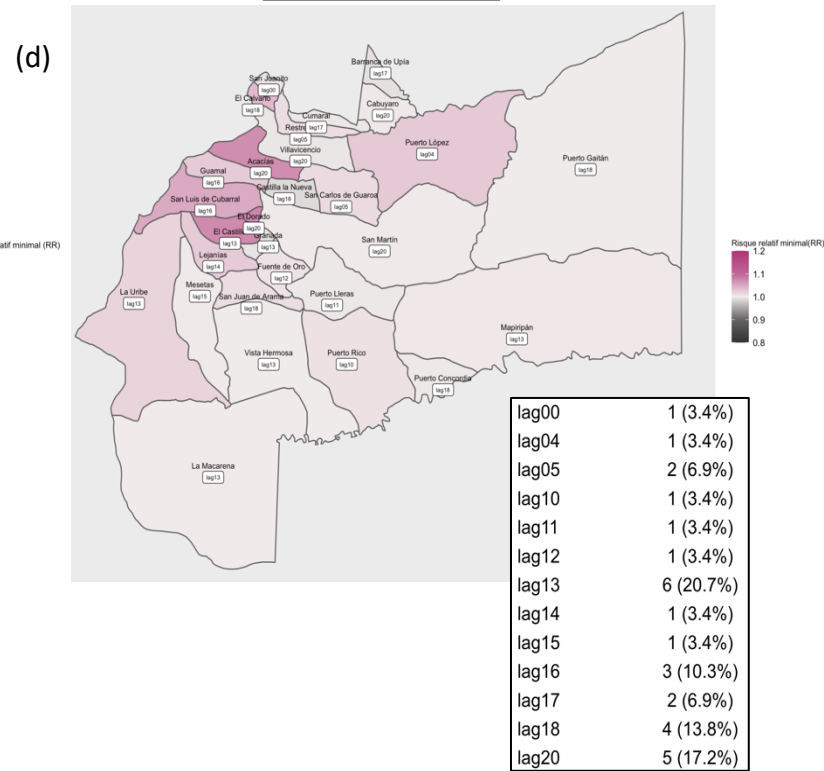
Quantile 50%



Quantile 75%



Quantile 95%

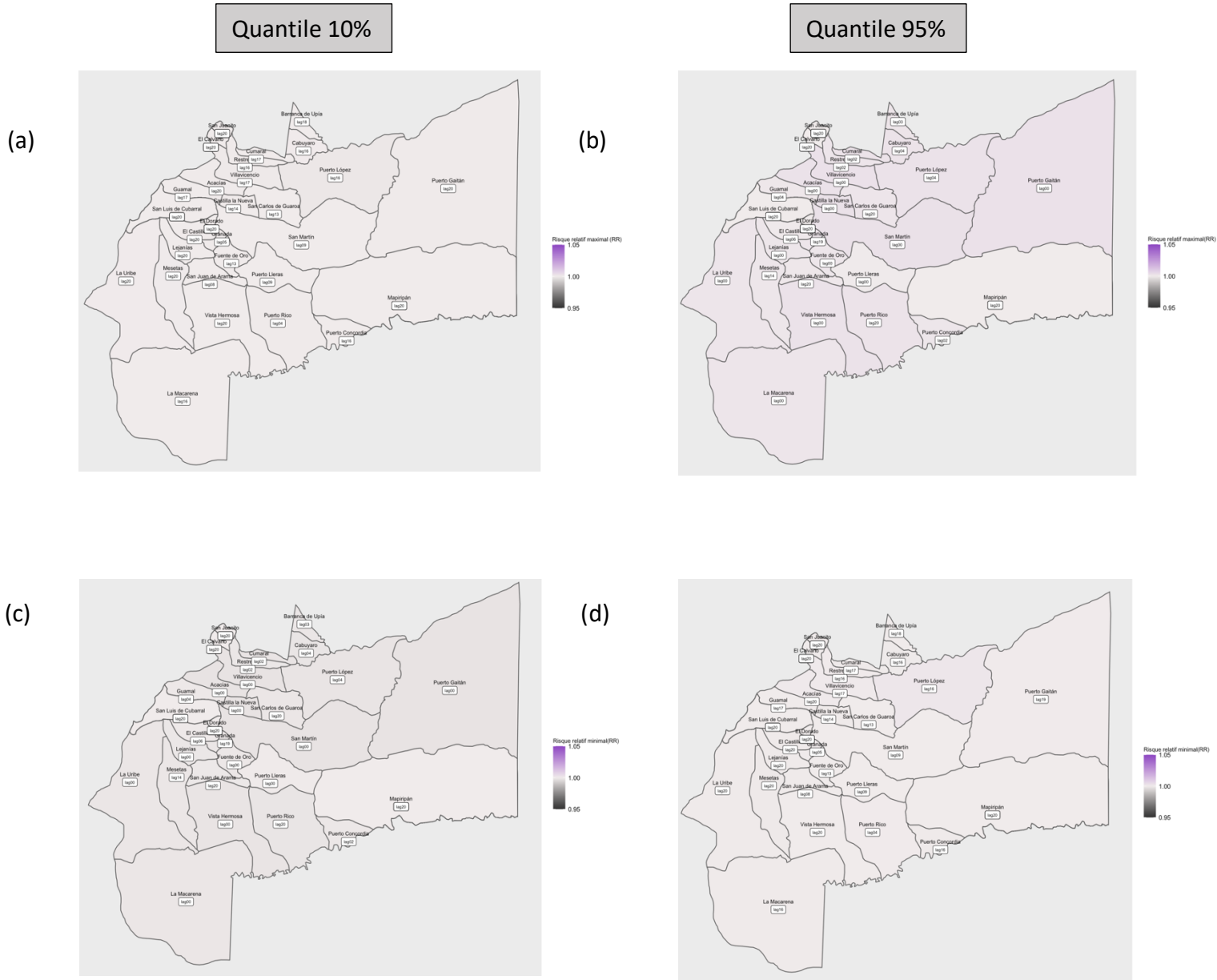


**Figure 52.** Carte géographique de Méta illustrant le **risque relatif (RR) minimal** avec le décalage où celui-ci est atteint pour la **température du point de rosée hebdomadaire moyenne** à un quantile de 10% (a), 50% (b), 75% (c) et 95% (d). Un tableau de densité des décalages est présenté dans le coin inférieur droit de la figure avec un compte et pourcentage des municipalités avec lesquels le décalage s'associe.



#### 4.2.3.4 Pression hebdomadaire moyenne au niveau de la mer

Finalement, tout comme les autres parties de cette analyse, la pression est une covariable qui n'a pas présenté des résultats très concluants en matière du risque accru et diminué face à l'incidence de la dengue. Les RR obtenus frôlent dans l'ensemble la valeur de 1 à un quantile de 10% ou 95% (figure 53).



**Figure 53.** Carte géographique de Méta illustrant le **risque relatif (RR) maximal** (a) et (b) et **minimal** (c) et (d) avec le décalage où celui-ci est atteint pour la pression au niveau de la mer hebdomadaire moyenne au niveau de la mer à un quantile de 10% et de 95%.



En somme, le RR maximal (1.97) est atteint à El Calvario à un décalage de 5 semaines des précipitations. Le RR minimal (0.44) est aussi atteint au sein de même municipalité à un décalage de 5 semaines des précipitations. Nous témoignons d'une influence minime de la covariable de pression hebdomadaire moyenne au niveau de la mer quant aux RR de la dengue.

## Chapitre 5 : Discussion

La littérature actuelle nous a prouvé une rareté d'études de la maladie de la dengue en lien avec des prédicteurs environnementaux dans le département Méta, au centre de la Colombie. Vu l'incidence élevée au sein de ce département, il est important d'émettre des conclusions pouvant aider dans la prise de décision afin de mieux gérer et prédire les vagues de morbidité<sup>185</sup>. La revue de littérature effectuée a priori a également mis une emphase sur l'ampleur de certains facteurs socioéconomiques et sociodémographiques sur la dengue à travers le monde dont les environnements urbains, les caractéristiques des logements et de la ville, la connectivité mondiale et les conditions sociales dues à leur impact indirect sur les milieux de reproduction de *Aedes*<sup>5,10,11,14,15,20-22,32,56,62,64,65,69,84-86,92,125,133</sup>. Des facteurs environnementaux ont également été rapportés comme possédant un rôle direct important sur la maladie et des effets sur les environnements des vecteurs à la source. Basés sur ces faits, les précipitations, la température ambiante de l'air, température du point de rosée (TPR) et la pression au niveau de la mer ont donc été sélectionnées dans ce mémoire de type écologique pour analyser leur association possible avec l'incidence de la dengue au sein du département Méta entre les années 2011 et 2019.

Le premier objectif de ce mémoire a permis notamment de comprendre d'une façon descriptive les variations chronologiques (tendance, saisonnalité) de la dengue ainsi que toutes les covariables environnementales à l'étude. Ensuite, la modélisation a permis d'approfondir la compréhension de l'impact temporel des covariables sur le risque relatif des cas de la dengue. Ensemble, ces deux parties ont élucidé de façon exhaustive la situation de la dengue au sein du département en lien avec les facteurs environnementaux.

### 5.1 Sommaire des résultats

#### 5.1.1 Objectif 1

Les premières analyses descriptives ont montré que les années 2019, 2015 et 2013 sur l'incidence de la dengue ont relevé des hausses exceptionnelles de cas à travers du département Méta en Colombie. Ceci a été aussi le cas dans d'autres départements en Colombie comme le démontrent les données dans l'étude de Gutierrez-Barbosa et co-auteurs<sup>4</sup>. Par contre, en comparant

nos statistiques à celles de niveau national, nous voyons que Méta diffère de l'ensemble du pays pour les périodes à basses incidences<sup>4</sup>.

Les décompositions des séries chronologiques nous ont servi d'outils pour décortiquer la tendance et la saisonnalité pouvant exister. Pour ce qui est de la tendance à long terme de l'incidence de la maladie, la fin de la période d'étude, soit à partir de 2016, met de l'avant une décroissance des incidences de la dengue à travers le département avec l'exception de San Juanito où une croissance est témoignée à partir de 2016 a été observée. Avant 2016, il a été constaté dans l'ensemble une croissance avec une rupture de tendance en 2016. El Calvario représente l'exception avec une décroissance des incidences même avant 2016. De plus, Mapiripan se distingue avec une valeur considérablement plus élevée par rapport au reste du département. En comparant ces observations avec celles des covariables environnementales, nous constatons qu'elles ne justifient pas directement la fluctuation et les distinctions notées.

Comme d'autres études existantes(196–198), l'effet saisonnier est assurément existant dans ce projet, mais non uniforme à travers du département. Un regard de plus près annuellement a permis de conclure que les incidences de dengue les plus élevées se retrouvent entre janvier et juillet, une dynamique coïncidant avec la saison pluvieuse de Colombie<sup>21</sup>. Ainsi, les résultats des variables prédictives environnementales nous ont permis d'émettre plusieurs conclusions quant à leur impact sur les incidences de la dengue. Entre mai et juillet, les valeurs les plus élevées pour les précipitations, les TPR ainsi que la pression étaient majoritairement témoignées. Pour la température ambiante, cette période se caractérise comme reflétant les valeurs les plus basses. Cette covariable présente ses valeurs les plus élevées entre janvier et avril. Entre aout et décembre, les pluviosités tendent à baisser pour la plupart des municipalités. Les TPR voient le seuil minimal atteint entre janvier et avril, tandis que la pression le témoigne entre novembre et décembre. Il n'existe pas d'études sur la dengue avec un contexte identique (facteurs climatiques et environnementaux retenus à Méta) auxquelles nous pouvons comparer nos trouvailles. Ainsi, nous croyons que les mesures d'intervention et préventives devraient varier selon les périodes de l'année sachant que la saisonnalité joue un rôle significatif.

### 5.1.2 Objectif 2

Cette partie du mémoire nous a permis de confirmer les prédicteurs qui, hypothétiquement, jouent un rôle dans la fluctuation de la dengue à Méta. En somme, la pression est le seul prédicteur étant non significatif dans le contexte de notre étude. Ceci vient s'opposer aux trouvailles de certaines études dans le monde dont celle de Gomez et al qui ont trouvé une association positive et Chen et al. ayant trouvé une association négative<sup>195,196</sup>. Les autres variables le sont à des niveaux différents. Les RR associés aux précipitations et à la température ambiante augmentent proportionnellement avec les quantiles<sup>73,102</sup>. Les précipitations influencent d'une façon significative l'incidence à la dengue avec RR allant jusqu'à 2.0, ceci est en accord avec la littérature vu le nombre important d'études ayant conclu la pertinence de ce facteur de risque<sup>7,16,28,65,91,92,104-106,113,114,197</sup>. Ainsi, les seuils de pluviométrie atteints au sein du département favorisant une augmentation de la dengue peuvent aller jusqu'à 77.5 mm de précipitations hebdomadaires moyennes. La TPR suit avec un RR qui peut atteindre 1.2. Ensuite, la température ambiante semble avoir un effet linéaire avec RR allant à 1.10, une relation trouvée par plusieurs autres études<sup>22,197</sup>. Nos conclusions rejoignent donc les travaux antérieurs rapportant des associations entre ces variables et leurs impacts directs sur les incidences de la dengue<sup>14,16,17,28, 61, 64,65,76,90, 91, 92,104-108</sup>. D'ailleurs, dépendamment des municipalités, nous voyons la transition vers un RR supérieur à 1 à des températures entre 12°C et 23.5°C, basé sur Guamal et Puerto Lopez, les municipalités les plus froides et chaudes du département. Ceci chevauche donc les conclusions de plusieurs études ayant défini les températures suivantes comme étant convenables à la propagation de la dengue : 22 - 25°C<sup>73</sup>,  $\geq 18^\circ\text{C}$ <sup>198</sup>, 21.6 - 32.9 °C<sup>95</sup>, 22-28°C<sup>196</sup>, 15 - 35°C<sup>112</sup> et 17-27°C<sup>29</sup>.

En se focalisant exclusivement sur les décalages, les RR maximaux sont majoritairement atteints à aucune, 5 semaines et 20 semaines de décalage pour les précipitations tout dépendamment des municipalités, ceci est aussi confirmé dans l'étude de Hii et al<sup>22</sup>. Pour ce qui en est de la température ambiante, 20 semaines et 15 semaines semblent être les périodes idéales pour un RR maximal de la dengue comparativement à 2 semaines ayant été rapporté dans l'étude de Tran et al<sup>199</sup>. Finalement, un décalage idéal est perçu à un temps réel, 4 semaines, 2 semaines ainsi que 20 semaines pour la TPR selon les municipalités. Les valeurs des RR minimaux des précipitations ont l'effet le plus minimal à 16 semaines et 12 semaines de décalage. La température

ambiante influence la dengue minimalement à un temps réel. Finalement, le décalage ou le RR minimal est perçu pour la TPR est à 13 semaines, 20 semaines ainsi que 18 semaines. Le prédictueur de la pression n'a pas donné lieu à des résultats conclusifs sur un plan statistique contrairement aux nombreuses études rapportées dans notre revue qui ont découvert des associations autant positives que négatives dans d'autres régions du monde<sup>17,81,101,119,120</sup>. Les RR côtoyaient tous la valeur de 1, nous permettant de conclure qu'en fait, à Méta, ce prédictueur ne pèse pas autant sur l'incidence de la dengue.

Les chiffres d'El Calvario et de San Juanito, deux municipalités adjacentes au Nord de Méta, se démarquent significativement des autres parvenant à des RR de 1.97 et 1.61 respectivement pour la covariable de précipitations pour des décalages de 5 et 20 semaines. On pourrait justifier ces chiffres par les événements de pluie atteignant des valeurs considérablement plus élevées que la marge normale, sans atteindre le seuil nuisible. Contrairement à des études existantes ayant pu mettre une délimitation entre les précipitations avantageuses et désavantageuses sur les vecteurs, dont celle de Benedum et ses co-auteurs<sup>201</sup>, la région de Méta n'a pas démontré une valeur de la sorte. Finalement, on pourrait croire que la dépendance géographique joue un rôle sur ce phénomène vu leur proximité. En lien avec ce point, à travers des multiples cartes géographiques créées dans le cadre de ce mémoire, on observe des tendances similaires récurrentes dans la région ouest du département. Cependant, dans cette étude, il n'y a eu aucune évaluation sur l'impact du nombre d'incidences d'une municipalité donnée sur les municipalités voisines.

## **5.2 Forces**

Cette étude a permis d'examiner l'association des prédictueurs environnementaux avec les incidences de la dengue de façon globale au sein de Méta, mais également sur les tendances individuelles d'une municipalité donnée. Notre but principal était l'enrichissement de la littérature et la compréhension de l'impact de ses facteurs sur les incidences dans cette région. L'étude a aidé à définir des marges, des périodes ainsi que les régions géographiques critiques à surveiller pour de futures épidémies potentielles. Les observations émises par ce mémoire servent à l'élaboration de programmes de surveillance propre à cette région avec une focalisation sur les périodes critiques à des hausses de cas, tout dépendamment des facteurs environnementaux propices. Enfin, la rareté

des études portant sur la dengue à Méta particulièrement rend nos résultats importants sur un plan de surveillance.

Sur un plan méthodologique, contrairement à d'autres études, ce projet a utilisé une modélisation découlant des modèles markoviens à changement de régime. Ce dernier a permis d'examiner plusieurs composantes de l'incidence de la dengue incluant l'aspect non stationnaire des données qui dérivent du fait qu'il y a des périodes avec de forts cas de dengue et des périodes avec de faibles cas de dengue. Un modèle classique comme les modèles linéaires généralisés et les modèles additifs généralisés cités dans la revue de littérature (section 2.8) ne seront pas en mesure de bien modéliser ces différences. Ainsi, ce mémoire a permis de souligner cette observation et sera informatif pour les recherches futures. De plus, notre méthodologie est applicable à d'autres contextes endémiques pouvant donc bénéficier d'autres maladies au-delà de la dengue.

### **5.3 Limites et sources de biais**

Toute étude impose des limites et des biais, aléatoires ou systématiques, devant être pris en considération dans l'interprétation des résultats. Biais d'information et biais de confusion sont les principaux facteurs ayant pu affecter la précision ou la validité de nos conclusions.

#### **5.3.1 Biais d'information**

Le biais d'information se produit lorsqu'une variable à l'étude, que ce soit l'exposition (ou le facteur de risque), le résultat ou la covariable, est incorrectement classifiée ou mesurée. Cette erreur peut être liée à l'examineur, la personne examinée ou les outils utilisés. Au sein de ce mémoire, nous avons eu recours à SIVIGILA, une base de données secondaire issue de surveillance. Comme expliquée plus haut, ses données proviennent de déclaration de médecins, de professionnels de la santé et de laboratoires. Ceci inflige l'éventualité d'une sous-déclaration des cas de dengue due à l'absence de symptômes ou au non-recours à un professionnel de la santé pour certains cas symptomatiques. Testée par l'étude de Carabali et al. dans trois villes en Colombie (Cali, Medellin et Villavicencio), la probabilité moyenne de notification pour la dengue ne dépasse pas les 50%<sup>201</sup>. Pour cela, un biais d'information qui a pu conduire à une estimation erronée de l'association et ayant pu affecter la validité interne de l'étude a pu s'imposer et ceci a également

été rapporté par de nombreuses études ayant utilisé SIVIGILA<sup>4,192-196</sup>. Étant donné que la valeur réelle n'est pas connue, il nous est impossible de vérifier cette information. Une limite de notre étude est l'absence de mitigation de ce biais. Comme certaines études ont procédé, il serait intéressant d'avoir recours à des facteurs d'expansion ou d'effectuer des échantillonnages de séroprévalence et ainsi voir le pourcentage de population possédant les anticorps<sup>1</sup>. De plus, un autre biais d'information aurait pu se glisser quant à la mesure de l'infection de la dengue chez les sujets les confondant pour d'autres arbovirus, notamment Chikungunya ou Zika. Ce biais ayant également été testé en Colombie par Carabali et al. affecte particulièrement la mesure réelle du degré de sévérité de la maladie et amplifie ainsi la sous-déclaration<sup>1</sup>. Finalement, l'usage de données de télédétection environnementales au lieu d'observations environnementales au sol donne lieu à une possibilité d'erreurs de mesure quant à nos covariables d'intérêt. Cette erreur a d'ailleurs été rapportée par d'autres études utilisant ce type de données, dont celle de Zinszer et al. et Zhang et al.<sup>211,212</sup>.

### **5.3.2 Biais de confusion**

La confusion est un problème commun dans les études épidémiologiques. Un effet confondant est une distorsion altérant l'association observée qui est engendrée par des interrelations complexes présentes entre une maladie et ses facteurs de risque. Dans notre cas, étant donné l'omission de facteurs socioéconomiques et sociodémographiques tels que les environnements bâtis et d'autres facteurs météorologiques et environnementaux, un biais de confusion non mesuré pourrait s'appliquer. Il est fort possible que d'autres facteurs, notamment ceux mentionnés dans la revue à la section 2.4.2, influencent l'incidence de la dengue. Un exemple concret d'un biais de confusion serait l'abondance d'environnements bâtis qui sont à la fois associés à une augmentation de la température par la création d'ilots de chaleur et également liés à l'incidence de la dengue. Nous estimons que la non-considération de ces facteurs impacte l'analyse de nos résultats et que l'interprétation pourrait différer si ceux-ci étaient pris en compte. Des travaux futurs seraient nécessaires pour une compréhension des facteurs intégraux autant environnementaux que socioéconomiques et sociodémographiques qui affectent la dengue.

### **5.3.3 Validité externe**

Notre projet manque de validité externe étant donné que nos résultats ne sont pas généralisables au-delà de la population de notre étude. L'objectif de recherche principal dans notre

cas était de décrire la situation au sein de Méta et donner une orientation quant aux périodes et endroits à surveiller pour la maladie de la dengue, donc, nos conclusions sont propres et pertinentes à chacune des municipalités et à ce département spécifiquement. Ainsi, les risques relatifs obtenus ne peuvent pas être appliqués dans des contextes similaires (p.ex. à une température ambiante similaire) dans une autre localisation géographique étant donné que d'autres facteurs peuvent influencer les résultats. De plus, sachant que nous ne tenons pas compte des facteurs socioéconomiques et sociodémographiques, ceci fait en sorte que les résultats manquent une certaine profondeur et sont encore moins transmissibles à un autre contexte puisqu'on ne tient pas une certaine connaissance sur ces points.

#### **5.4 Retombées de l'étude et pistes futures**

Comme mentionné plus haut, l'étude ici présente rentre dans un projet de plus grande ampleur portant sur les arbovirus en Colombie. Cette étude a mesuré une série de caractéristiques environnementales et climatiques qui peuvent avoir une influence sur la transmission de la dengue par leurs effets sur l'écologie naturelle du vecteur à la source. Elle a notamment permis d'obtenir une image claire de l'incidence de la dengue entre 2011 et 2019. La forte association trouvée entre la TPR, la température ambiante et les précipitations démontrent tout en tenant compte des biais que ces covariables peuvent peser sur l'incidence de la dengue.

À la lumière de nos résultats, cette étude a un potentiel important de retombées concrètes pour la surveillance de la dengue à Méta. D'abord, ces informations s'ajoutent à l'ensemble de la littérature permettant d'approfondir les méthodes et les modélisations et d'éclairer les pratiques de surveillance. Elles permettront possiblement à guider l'élaboration de politiques et promotion de la santé dans la région de Méta par la compréhension améliorée des tendances spatio-temporelles. À partir du moment actuel, ce qui est nécessaire du département sont des actions de prévention et d'adaptation pour les régions davantage affectées et durant les périodes connues à risque accru. La connaissance de l'étendue des infections et le risque de transmission de la maladie sont cruciaux de sorte que la prévention et le contrôle peuvent tous deux être appliqués pour minimiser le fardeau de la maladie dans le futur.

Considérant l'importance d'une vision holistique de la santé, il serait intéressant de poursuivre l'avancement des données sur cette région et reproduire cette étude avec d'autres types de déterminants susceptibles d'influencer l'occurrence de la dengue soit des facteurs



socioéconomiques et sociodémographiques. En plus de cela, des données portant sur les populations vectorielles pourraient également permettre l'émission de meilleures conclusions précises aux régions géographiques. Ceci pourrait favoriser la clarification du rôle réel de certains facteurs de confusions sur la maladie de la dengue. De plus, une focalisation sur la région ouest de Méta afin d'interpréter la cause de la dépendance spatiale observée tout au long de ce projet serait pertinente. Ces points contribueraient non seulement à l'épidémiologie de la maladie, mais serviraient aussi à fournir des pistes aux chercheurs intéressés par l'avancement de recherches liées aux arbovirus.

## Chapitre 6 : Conclusion

En somme, ce mémoire visait deux objectifs principaux étant l'étude de la tendance de l'incidence hebdomadaire de la dengue à travers 29 municipalités du département Meta de façon individuelle et globale entre 2011 et 2019 et l'identification des prédicteurs météorologiques et environnementaux significatifs (p. ex., température, précipitations, humidité relative) ainsi que leurs décalages influençant la maladie. Ces observations à travers le temps et l'espace ont été utilisées pour une description exhaustive de la fluctuation de la dengue. Nous concluons que les précipitations sont les plus significatives face à cette maladie en temps réel (0 semaine) et à 5 semaines de décalage. Toutefois, la pression au niveau de la mer ne représente pas un prédicteur important au sein de cette région géographique contrairement à des études menées dans d'autres régions du monde. Quant à la température ambiante ainsi que la température du point de rosée, elles ont présenté des résultats assez significatifs avec un risque accru en temps réel et 20 semaines de décalage respectivement. Sur un plan géographique, la région ouest s'est avérée fréquemment démontrer des tendances similaires.

Notre étude vient ajouter à la littérature actuelle sur la dengue, une fièvre ne cessant d'émerger à travers le monde et affectant considérablement Méta. Nous espérons que nos trouvailles pourront renforcer la littérature sur la dengue en Colombie et approfondir la compréhension des tendances existantes. L'ajustement des efforts selon les saisons annuelles, la chronologie et la localisation consiste d'une autre piste que propose notre étude. La prise en compte de covariables socioéconomiques et sociodémographiques est la recommandation principale pour des recherches futures sur le sujet. Malgré ce qu'elle procure, une analyse prudente de nos résultats demeure nécessaire due aux biais ayant pu se glisser. Sur ce, nous espérons que la mise en valeur du fardeau important qu'engendre la dengue au sein de cette région géographique continue à apporter davantage d'attention autant au niveau médical que de la santé publique.

## Références bibliographiques

1. Gutierrez-Barbosa H, Medina-Moreno S, Zapata JC, Chua JV. Dengue Infections in Colombia: Epidemiological Trends of a Hyperendemic Country. *Trop Med Infect Dis.* déc 2020;5(4):156.
2. Mahy BWJ, Van Regenmortel MHV, éditeurs. *Encyclopedia of virology.* 3rd ed. Amsterdam ; Boston: Academic Press; 2008. 5 p.
3. Huang YJS, Higgs S, Vanlandingham DL. Emergence and re-emergence of mosquito-borne arboviruses. *Curr Opin Virol.* 1 févr 2019;34:104-9.
4. Gutiérrez LA, Pan American Health Organization / World Health Organization. 2015 [cité 27 juin 2022]. Disponible à: <https://www3.paho.org/data/index.php/en/mnu-topics/indicadores-dengue-en/annual-arbovirus-bulletin-2022.html>
5. Gubler DJ. Epidemic dengue/dengue hemorrhagic fever as a public health, social and economic problem in the 21st century. *Trends Microbiol.* 1 févr 2002;10(2):100-3.
6. Bhatt S, Gething PW, Brady OJ, Messina JP, Farlow AW, Moyes CL, et al. The global distribution and burden of dengue. *Nature.* avr 2013;496(7446):504-7.
7. Bett B, Grace D, Lee HS, Lindahl J, Nguyen-Viet H, Phuc PD, et al. Spatiotemporal analysis of historical records (2001–2012) on dengue fever in Vietnam and development of a statistical model for forecasting risk. *PLoS ONE.* 27 nov 2019;14(11):e0224353.
8. Global, regional, and national age-sex-specific mortality for 282 causes of death in 195 countries and territories, 1980–2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017. *Lancet Lond Engl.* 10 nov 2018;392(10159):1736-88.
9. Shepard DS, Undurraga EA, Halasa YA, Stanaway JD. The global economic burden of dengue: a systematic analysis. *Lancet Infect Dis.* 1 août 2016;16(8):935-41.
10. Hales S, de Wet N, Maindonald J, Woodward A. Potential effect of population and climate changes on global distribution of dengue fever: an empirical model. *The Lancet.* 14 sept 2002;360(9336):830-4.
11. Sutherst RW. Global Change and Human Vulnerability to Vector-Borne Diseases. *Clin Microbiol Rev.* janv 2004;17(1):136-73.
12. Young PR. Arboviruses: A Family on the Move. Dans: Hilgenfeld R, Vasudevan SG, éditeurs. *Dengue and Zika: Control and Antiviral Treatment Strategies [Internet].* Singapore: Springer; 2018 [cité 31 janv 2022]. p. 1-10. (Advances in Experimental Medicine and Biology). Disponible à: [https://doi.org/10.1007/978-981-10-8727-1\\_1](https://doi.org/10.1007/978-981-10-8727-1_1)

13. Lai WT, Chen CH, Hung H, Chen RB, Shete S, Wu CC. Recognizing spatial and temporal clustering patterns of dengue outbreaks in Taiwan. *BMC Infect Dis.* déc 2018;18(1):1-11.
14. Chala B, Hamde F. Emerging and Re-emerging Vector-Borne Infectious Diseases and the Challenges for Control: A Review. *Front Public Health.* 5 oct 2021;9:715759.
15. Henry S, Mendonça F de A. Past, Present, and Future Vulnerability to Dengue in Jamaica: A Spatial Analysis of Monthly Variations. *Int J Environ Res Public Health.* mai 2020;17(9):3156.
16. Shabbir W, Pilz J, Naeem A. A spatial-temporal study for the spread of dengue depending on climate factors in Pakistan (2006–2017). *BMC Public Health.* déc 2020;20(1):1-10.
17. Dhewantara PW, Marina R, Puspita T, Ariati Y, Purwanto E, Hananto M, et al. Spatial and temporal variation of dengue incidence in the island of Bali, Indonesia: An ecological study. *Travel Med Infect Dis.* 1 nov 2019;32:101437.
18. Colombia: Dengue Outbreak Emergency Plan of Action (EPoA) DREF n° MDRCO016 - Colombia | ReliefWeb [Internet]. [cité 20 nov 2022]. Disponible à: <https://reliefweb.int/report/colombia/colombia-dengue-outbreak-emergency-plan-action-epoa-dref-n-mdrco016>
19. Chen Y, Zhao Z, Li Z, Li W, Li Z, Guo R, et al. Spatiotemporal Transmission Patterns and Determinants of Dengue Fever: A Case Study of Guangzhou, China. *Int J Environ Res Public Health.* juill 2019;16(14):2486.
20. Kuno G, Gubler DJ. *Dengue and dengue hemorrhagic fever.* Wallingford, Oxon, UK ; CAB International; 1997. xi+478.
21. Khetarpal N, Khanna I. *Dengue Fever: Causes, Complications, and Vaccine Strategies.* J Immunol Res. 2016;2016:6803098.
22. Buonsenso D, Barone G, Onesimo R, Calzedda R, Chiaretti A, Valentini P. The re-emergence of dengue virus in non-endemic countries: a case series. *BMC Res Notes.* 3 sept 2014;7(1):596.
23. Hii YL, Zhu H, Ng N, Ng LC, Rocklöv J. Forecast of Dengue Incidence Using Temperature and Rainfall. *PLoS Negl Trop Dis.* 29 nov 2012;6(11):e1908.
24. Acharya BK, Cao C, Xu M, Chen W, Pandit S. Spatiotemporal Distribution and Geospatial Diffusion Patterns of 2013 Dengue Outbreak in Jhapa District, Nepal. *Asia Pac J Public Health.* 1 mai 2018;30(4):396-405.
25. Amarasinghe A, Kuritsky JN, Letson GW, Margolis HS. Dengue Virus Infection in Africa. *Emerg Infect Dis.* août 2011;17(8):1349-54.
26. Gibbons RV, Vaughn DW. Dengue: an escalating problem. *BMJ.* 29 juin 2002;324(7353):1563-6.

27. Dengue Fever: Symptoms, Causes, and Treatments [Internet]. [cité 1 nov 2021]. Disponible à: <https://www.webmd.com/a-to-z-guides/dengue-fever-reference>
28. Villar LA, Rojas DP, Besada-Lombana S, Sarti E. Epidemiological Trends of Dengue Disease in Colombia (2000-2011): A Systematic Review. *PLoS Negl Trop Dis*. 19 mars 2015;9(3):e0003499.
29. Wangdi K, Clements ACA, Du T, Nery SV. Spatial and temporal patterns of dengue infections in Timor-Leste, 2005–2013. *Parasit Vectors*. 4 janv 2018;11:9.
30. Elling R, Henneke P, Hatz C, Hufnagel M. Dengue Fever in Children: Where Are We Now? *Pediatr Infect Dis J*. sept 2013;32(9):1020-2.
31. Anders KL, Nguyet NM, Van Vinh Chau N, Hung NT, Thuy TT, Lien LB, et al. Epidemiological Factors Associated with Dengue Shock Syndrome and Mortality in Hospitalized Dengue Patients in Ho Chi Minh City, Vietnam. *Am J Trop Med Hyg*. 5 janv 2011;84(1):127-34.
32. Aziz AT, Al-Shami SA, Mahyoub JA, Hatabbi M, Ahmad AH, Md Rawi CS. Promoting health education and public awareness about dengue and its mosquito vector in Saudi Arabia. *Parasit Vectors*. 18 nov 2014;7:487.
33. Gubler DJ. Dengue Viruses. Dans: Mahy BWJ, Van Regenmortel MHV, éditeurs. *Encyclopedia of Virology (Third Edition)* [Internet]. Oxford: Academic Press; 2008 [cité 12 avr 2022]. p. 5-14. Disponible à: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123744104003800>
34. Rodenhuis-Zybert IA, Wilschut J, Smit JM. Dengue virus life cycle: viral and host factors modulating infectivity. *Cell Mol Life Sci*. 1 août 2010;67(16):2773-86.
35. ABUALAMAH WA, BANNI HS, ALMASMOUM HA, ALLOHIBI YA, SAMARIN HM, BAFAIL MA. Determining Risk Factors for Dengue Fever Severity in Jeddah City, a Case-Control Study (2017). *Pol J Microbiol*. sept 2020;69(3):331-7.
36. Rajapakse S. Dengue shock. *J Emerg Trauma Shock*. 2011;4(1):120-7.
37. Bouri N, Sell TK, Franco C, Adalja AA, Henderson DA, Hynes NA. Return of Epidemic Dengue in the United States: Implications for the Public Health Practitioner. *Public Health Rep*. 2012;127(3):259-66.
38. World Health Organization. Dengue guidelines for diagnosis, treatment, prevention and control : new edition [Internet]. World Health Organization; 2009 [cité 25 juin 2022]. Report No.: WHO/HTM/NTD/DEN/2009.1. Disponible à: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/44188>
39. Symptoms and Treatment | Dengue | CDC [Internet]. 2021 [cité 2 nov 2021]. Disponible à: <https://www.cdc.gov/dengue/symptoms/index.html>

40. Simmons CP, Farrar JJ, van Vinh Chau N, Wills B. Dengue. *N Engl J Med*. 12 avr 2012;366(15):1423-32.
41. World Health Organization. Dengue et dengue sévère [Internet]. 2021 [cité 20 sept 2021]. Disponible à: <https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/dengue-and-severe-dengue>
42. Dunkin MA. Dengue Fever [Internet]. WebMD. [cité 2 nov 2021]. Disponible à: <https://www.webmd.com/a-to-z-guides/dengue-fever-reference>
43. Roy SK, Bhattacharjee S. Dengue virus: epidemiology, biology, and disease aetiology. *Can J Microbiol* [Internet]. 25 juin 2021 [cité 31 janv 2022]; Disponible à: <https://cdnsiencepub.com/doi/abs/10.1139/cjm-2020-0572>
44. Clinical Presentation | Dengue | CDC [Internet]. 2021 [cité 7 mars 2022]. Disponible à: <https://www.cdc.gov/dengue/healthcare-providers/clinical-presentation.html>
45. Agrawal VK, Prusty BSK, Reddy CS, Mohan Reddy GK, Agrawal RK, Sekher Srinivasarao Bandaru VC. Clinical profile and predictors of Severe Dengue disease: A study from South India. *Casp J Intern Med*. 2018;9(4):334-40.
46. Huy NT, Van Giang T, Thuy DHD, Kikuchi M, Hien TT, Zamora J, et al. Factors Associated with Dengue Shock Syndrome: A Systematic Review and Meta-Analysis. *PLoS Negl Trop Dis*. 26 sept 2013;7(9):e2412.
47. Canada PHA of. Dengue fever [Internet]. 2014 [cité 2 nov 2021]. Disponible à: <https://www.canada.ca/en/public-health/services/infectious-diseases/viral-haemorrhagic-fevers/dengue-fever/symptoms.html>
48. Halstead SB. Dengue Antibody-Dependent Enhancement: Knowns and Unknowns. *Microbiol Spectr*. 12 déc 2014;2(6):2.6.30.
49. Pinto RC, de Castro DB, de Albuquerque BC, Sampaio V de S, dos Passos RA, da Costa CF, et al. Mortality Predictors in Patients with Severe Dengue in the State of Amazonas, Brazil. *PLoS ONE*. 26 août 2016;11(8):e0161884.
50. Aung KLL, Thanachartwet V, Desakorn V, Chamnanchanunt S, Sahassananda D, Chierakul W, et al. Factors associated with severe clinical manifestation of dengue among adults in Thailand. *Southeast Asian J Trop Med Public Health*. 4 juill 2013;44(4):602-12.
51. Nelson textbook of pediatrics (eBook, 2020) [WorldCat.org] [Internet]. [cité 27 juin 2022]. Disponible à: <https://www.worldcat.org/title/nelson-textbook-of-pediatrics/oclc/1096283151>
52. Murray NEA, Quam MB, Wilder-Smith A. Epidemiology of dengue: past, present and future prospects. *Clin Epidemiol*. 20 août 2013;5:299-309.

53. Raafat N, Blacksell SD, Maude RJ. A review of dengue diagnostics and implications for surveillance and control. *Trans R Soc Trop Med Hyg.* nov 2019;113(11):653-60.
54. Chaterji S, Allen JC, Chow A, Leo YS, Ooi EE. Evaluation of the NS1 Rapid Test and the WHO Dengue Classification Schemes for Use as Bedside Diagnosis of Acute Dengue Fever in Adults. *Am J Trop Med Hyg.* 4 févr 2011;84(2):224-8.
55. Najjioullah F, Viron F, Césaire R. Evaluation of four commercial real-time RT-PCR kits for the detection of dengue viruses in clinical samples. *Virol J.* 15 sept 2014;11:164.
56. Guzman MG, Harris E. Dengue. *The Lancet.* 31 janv 2015;385(9966):453-65.
57. Acharya BK, Cao C, Lakes T, Chen W, Naeem S. Spatiotemporal analysis of dengue fever in Nepal from 2010 to 2014. *BMC Public Health.* déc 2016;16(1):1-10.
58. Aedes | Description, Life Cycle, & Disease Transmission | Britannica [Internet]. [cité 27 mars 2022]. Disponible à: <https://www.britannica.com/animal/Aedes>
59. Bennett KL, Gómez-Martínez C, Chin Y, Saltonstall K, McMillan WO, Rovira JR, et al. Dynamics and diversity of bacteria associated with the disease vectors *Aedes aegypti* and *Aedes albopictus*. *Sci Rep.* 21 août 2019;9:12160.
60. Näslund J, Ahlm C, Islam K, Evander M, Bucht G, Lwande OW. Emerging Mosquito-Borne Viruses Linked to *Aedes aegypti* and *Aedes albopictus*: Global Status and Preventive Strategies. *Vector-Borne Zoonotic Dis.* oct 2021;21(10):731-46.
61. Weaver SC, Barrett ADT. Chapter 12 - Recent Expansion of Mosquito-Borne Pathogens Into Texas. Dans: Debboun M, Nava MR, Rueda LM, éditeurs. *Mosquitoes, Communities, and Public Health in Texas* [Internet]. Academic Press; 2020 [cité 12 avr 2022]. p. 339-58. Disponible à: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128145456000122>
62. Zhou G, Kohlhepp P, Geiser D, Frasquillo M del C, Vazquez-Moreno L, Winzerling JJ. Fate of blood meal iron in mosquitos. *J Insect Physiol.* nov 2007;53(11):1169-78.
63. Lounibos LP, Kramer LD. Invasiveness of *Aedes aegypti* and *Aedes albopictus* and Vectorial Capacity for Chikungunya Virus. *J Infect Dis.* 15 déc 2016;214(Suppl 5):S453-8.
64. Wu P, Yu X, Wang P, Cheng G. Arbovirus lifecycle in mosquito: acquisition, propagation and transmission. *Expert Rev Mol Med* [Internet]. ed 2019 [cité 14 janv 2022];21. Disponible à: <http://www.cambridge.org/core/journals/expert-reviews-in-molecular-medicine/article/arbovirus-lifecycle-in-mosquito-acquisition-propagation-and-transmission/953FAA1D979935992D2EFB26FC39B4E3>
65. Nimmo D. *Aedes aegypti* and *Aedes albopictus*: Life cycle, biology and distribution. [Internet]. [cité 27 juin 2022]. Disponible à: [http://www.genewatch.org/uploads/f03c6d66a9b354535738483c1c3d49e4/appen\\_4\\_\\_doc\\_4.pdf](http://www.genewatch.org/uploads/f03c6d66a9b354535738483c1c3d49e4/appen_4__doc_4.pdf)

66. Dengue Around the World | Dengue | CDC [Internet]. [cité 12 juin 2022]. Disponible à: <https://www.cdc.gov/dengue/areaswithrisk/around-the-world.html>
67. Harrington LC, Scott TW, Lerdthusnee K, Coleman RC, Costero A, Clark GG, et al. DISPERSAL OF THE DENGUE VECTOR Aedes Aegypti WITHIN AND BETWEEN RURAL COMMUNITIES. *Am J Trop Med Hyg.* 1 févr 2005;72(2):209-20.
68. Teurlai M, Menkès CE, Cavarero V, Degallier N, Descloux E, Grangeon JP, et al. Socio-economic and Climate Factors Associated with Dengue Fever Spatial Heterogeneity: A Worked Example in New Caledonia. *PLoS Negl Trop Dis.* 1 déc 2015;9(12):e0004211.
69. CDC. Potential Range of Aedes Mosquitoes in US | CDC [Internet]. Centers for Disease Control and Prevention. 2020 [cité 6 déc 2021]. Disponible à: <https://www.cdc.gov/mosquitoes/mosquito-control/professionals/range.html>
70. Aedes Mosquito - Pest Control - Bayer [Internet]. [cité 19 juin 2022]. Disponible à: <https://www.environmentalscience.bayer.ph/pest-management/whattocontrol/aedes-mosquito>
71. Reiskind MH, Lounibos LP. Spatial and temporal patterns of abundance of *Aedes aegypti* L. (*Stegomyia aegypti*) and *Aedes albopictus* (Skuse) [*Stegomyia albopictus* (Skuse)] in southern Florida. *Med Vet Entomol.* 1 déc 2013;27(4):421-9.
72. Rezza G. *Aedes albopictus* and the reemergence of Dengue. *BMC Public Health.* 24 janv 2012;12:72.
73. Kamal M, Kenawy MA, Rady MH, Khaled AS, Samy AM. Mapping the global potential distributions of two arboviral vectors *Aedes aegypti* and *Ae. albopictus* under changing climate. *PLoS ONE.* 31 déc 2018;13(12):e0210122.
74. Angel B, Joshi V. V (2008) Distribution and seasonality of vertically transmitted dengue viruses in *Aedes* mosquitoes in arid and semi-arid areas of. *J Vector Borne Dis.* :56-9.
75. Guo X, Zhao T, Dong Y, Lu B. Survival and Replication of Dengue-2 Virus in Diapausing Eggs of *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae). *J Med Entomol.* 1 mai 2007;44(3):492-7.
76. Joshi V, Mourya DT, Sharma RC. 2002 Persistence of dengue-3 virus through transovarial transmission passage in successive generations of *Aedes aegypti* mosquitoes.
77. Lozano-Fuentes S, Hayden MH, Welsh-Rodriguez C, Ochoa-Martinez C, Tapia-Santos B, Kobylinski KC, et al. The Dengue Virus Mosquito Vector *Aedes aegypti* at High Elevation in México. *Am J Trop Med Hyg.* 7 nov 2012;87(5):902-9.
78. How important is vertical transmission in mosquitoes for the persistence of dengue? Insights from a mathematical model - ScienceDirect [Internet]. [cité 25 juin 2022]. Disponible à: <https://www-sciencedirect-com.proxy.bib.uottawa.ca/science/article/pii/S1755436510000022?via%3Dihub>



79. Mousson L, Zouache K, Arias-Goeta C, Raquin V, Mavingui P, Failloux AB. The Native Wolbachia Symbionts Limit Transmission of Dengue Virus in *Aedes albopictus*. *PLoS Negl Trop Dis*. 27 déc 2012;6(12):e1989.
80. Alphey L, McKemey A, Nimmo D, Neira Oviedo M, Lacroix R, Matzen K, et al. Genetic control of *Aedes* mosquitoes. *Pathog Glob Health*. juin 2013;107(4):170-9.
81. Gubler DJ. Dengue, Urbanization and Globalization: The Unholy Trinity of the 21st Century. *Trop Med Health*. déc 2011;39(4 Suppl):3-11.
82. Delatte H, Paupy C, Dehecq JS, Thiria J, Failloux AB, Fontenille D. [*Aedes albopictus*, vector of chikungunya and dengue viruses in Reunion Island: biology and control]. *Parasite Paris Fr*. mars 2008;15(1):3-13.
83. The relationship between healthy hygiene behavior and dengue haemorrhagic fever (DHF) incidence in Semarang - IOPscience [Internet]. [cité 27 juin 2022]. Disponible à : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1025/1/012062>
84. Liu-Helmersson J, Stenlund H, Wilder-Smith A, Rocklöv J. Vectorial Capacity of *Aedes aegypti*: Effects of Temperature and Implications for Global Dengue Epidemic Potential. *PLoS ONE*. 6 mars 2014;9(3):e89783.
85. Karim MdN, Munshi SU, Anwar N, Alam MdS. Climatic factors influencing dengue cases in Dhaka city: A model for dengue prediction. *Indian J Med Res*. juill 2012;136(1):32-9.
86. Hii YL, Rocklöv J, Ng N, Tang CS, Pang FY, Sauerborn R. Climate variability and increase in intensity and magnitude of dengue incidence in Singapore. *Glob Health Action*. 11 nov 2009;2:10.3402/gha.v2i0.2036.
87. Cuong HQ, Vu NT, Cazelles B, Boni MF, Thai KTD, Rabaa MA, et al. Spatiotemporal Dynamics of Dengue Epidemics, Southern Vietnam. *Emerg Infect Dis*. juin 2013;19(6):945-53.
88. Earnest A, Tan SB, Wilder-Smith A. Meteorological factors and El Niño Southern Oscillation are independently associated with dengue infections. *Epidemiol Infect*. juill 2012;140(7):1244-51.
89. Gomes AF, Nobre AA, Cruz OG. Temporal analysis of the relationship between dengue and meteorological variables in the city of Rio de Janeiro, Brazil, 2001-2009. *Cad Saúde Pública*. nov 2012;28:2189-97.
90. Xiang J, Hansen A, Liu Q, Liu X, Tong MX, Sun Y, et al. Association between dengue fever incidence and meteorological factors in Guangzhou, China, 2005–2014. *Environ Res*. 1 févr 2017;153:17-26.
91. Susilawaty A, Ekasari R, Widiastuty L, Wijaya DR, Arranury Z, Basri S. Climate factors and dengue fever occurrence in Makassar during period of 2011–2017. *Gac Sanit*. 1 janv 2021;35:S408-12.

92. Mordecai EA, Cohen JM, Evans MV, Gudapati P, Johnson LR, Lippi CA, et al. Detecting the impact of temperature on transmission of Zika, dengue, and chikungunya using mechanistic models. *PLoS Negl Trop Dis*. 27 avr 2017;11(4):e0005568.
93. Tsheten T, Clements ACA, Gray DJ, Wangchuk S, Wangdi K. Spatial and temporal patterns of dengue incidence in Bhutan: a Bayesian analysis. *Emerg Microbes Infect*. 15 juin 2020;9(1):1360-71.
94. Lambrechts L, Paaijmans KP, Fansiri T, Carrington LB, Kramer LD, Thomas MB, et al. Impact of daily temperature fluctuations on dengue virus transmission by *Aedes aegypti*. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 3 mai 2011;108(18):7460-5.
95. Wang WH, Urbina AN, Chang MR, Assavalapsakul W, Lu PL, Chen YH, et al. Dengue hemorrhagic fever - A systemic literature review of current perspectives on pathogenesis, prevention and control. *J Microbiol Immunol Infect Wei Mian Yu Gan Ran Za Zhi*. déc 2020;53(6):963-78.
96. Patterns of dengue in Nepal from 2010–2019 in relation to elevation and climate | *Transactions of The Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene* | Oxford Academic [Internet]. [cité 25 juin 2022]. Disponible à: <https://academic.oup.com/trstmh/article/115/7/741/5983697?login=true>
97. Charette M, Berrang-Ford L, Coomes O, Llanos-Cuentas EA, Cárcamo C, Kulkarni M, et al. Dengue Incidence and Sociodemographic Conditions in Pucallpa, Peruvian Amazon: What Role for Modification of the Dengue–Temperature Relationship? *Am J Trop Med Hyg*. janv 2020;102(1):180-90.
98. Cheong YL, Burkart K, Leitão PJ, Lakes T. Assessing Weather Effects on Dengue Disease in Malaysia. *Int J Environ Res Public Health*. déc 2013;10(12):6319-34.
99. Faruk MO, Jannat SN, Rahman MdS. Impact of environmental factors on the spread of dengue fever in Sri Lanka. *Int J Environ Sci Technol* [Internet]. 14 janv 2022 [cité 8 févr 2022]; Disponible à: <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03905-y>
100. Ramachandran VG, Roy P, Das S, Mogha NS, Bansal AK. Empirical model for estimating dengue incidence using temperature, rainfall, and relative humidity: a 19-year retrospective analysis in East Delhi. *Epidemiol Health*. 27 nov 2016;38:e2016052.
101. Lu L, Lin H, Tian L, Yang W, Sun J, Liu Q. Time series analysis of dengue fever and weather in Guangzhou, China. *BMC Public Health*. 27 oct 2009;9:395.
102. McMichael AJ, Woodruff RE, Hales S. Climate change and human health: present and future risks. *The Lancet*. 11 mars 2006;367(9513):859-69.
103. Juliano SA, O’Meara GF, Morrill JR, Cutwa MM. Desiccation and thermal tolerance of eggs and the coexistence of competing mosquitoes. *Oecologia*. 1 févr 2002;130(3):458-69.

104. Colón-González FJ, Soares Bastos L, Hofmann B, Hopkin A, Harpham Q, Crocker T, et al. Probabilistic seasonal dengue forecasting in Vietnam: A modelling study using superensembles. *PLoS Med.* 4 mars 2021;18(3):e1003542.
105. Alkhaldy I. Modelling the association of dengue fever cases with temperature and relative humidity in Jeddah, Saudi Arabia—A generalised linear model with break-point analysis. *Acta Trop.* 1 avr 2017;168:9-15.
106. Wu PC, Guo HR, Lung SC, Lin CY, Su HJ. Weather as an effective predictor for occurrence of dengue fever in Taiwan. *Acta Trop.* 1 juill 2007;103(1):50-7.
107. US Department of Commerce N. Dew Point vs Humidity [Internet]. NOAA's National Weather Service; [cité 12 nov 2022]. Disponible à: [https://www.weather.gov/arx/why\\_dewpoint\\_vs\\_humidity](https://www.weather.gov/arx/why_dewpoint_vs_humidity)
108. Dewpoint Temperature - an overview | ScienceDirect Topics [Internet]. [cité 19 sept 2022]. Disponible à: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/dewpoint-temperature>
109. The ERA5 global reanalysis - Hersbach - 2020 - Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society - Wiley Online Library [Internet]. [cité 12 nov 2022]. Disponible à: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/qj.3803>
110. US Department of Commerce N. Dew Point vs Humidity [Internet]. NOAA's National Weather Service; [cité 19 sept 2022]. Disponible à: [https://www.weather.gov/arx/why\\_dewpoint\\_vs\\_humidity](https://www.weather.gov/arx/why_dewpoint_vs_humidity)
111. Ehelepola NDB, Ariyaratne K, Buddhadasa WMNP, Ratnayake S, Wickramasinghe M. A study of the correlation between dengue and weather in Kandy City, Sri Lanka (2003 -2012) and lessons learned. *Infect Dis Poverty.* 24 sept 2015;4:42.
112. Ahmad R, Suzilah I, Wan Najdah WMA, Topek O, Mustafakamal I, Lee HL. Factors determining dengue outbreak in Malaysia. *PLoS ONE.* 23 févr 2018;13(2):e0193326.
113. Chien LC, Yu HL. Impact of meteorological factors on the spatiotemporal patterns of dengue fever incidence. *Environ Int.* 1 déc 2014;73:46-56.
114. Tosepu R, Tantrakarnapa K, Nakhapakorn K, Worakhunpiset S. Climate variability and dengue hemorrhagic fever in Southeast Sulawesi Province, Indonesia. *Environ Sci Pollut Res.* 1 mai 2018;25(15):14944-52.
115. Tsheten T, Mclure A, Clements ACA, Gray DJ, Wangdi T, Wangchuk S, et al. Epidemiological Analysis of the 2019 Dengue Epidemic in Bhutan. *Int J Environ Res Public Health.* janv 2021;18(1):354.
116. Adde A, Roucou P, Mangeas M, Ardillon V, Desenclos JC, Rousset D, et al. Predicting Dengue Fever Outbreaks in French Guiana Using Climate Indicators. *PLoS Negl Trop Dis.* 29 avr 2016;10(4):e0004681.

117. Atique S, Chan TC, Chen CC, Hsu CY, Iqtidar S, Louis VR, et al. Investigating spatio-temporal distribution and diffusion patterns of the dengue outbreak in Swat, Pakistan. *J Infect Public Health*. 1 juill 2018;11(4):550-7.
118. Kesetyaningsih TW, Andarini S, Sudarto, Pramoedyo H. DETERMINATION OF ENVIRONMENTAL FACTORS AFFECTING DENGUE INCIDENCE IN SLEMAN DISTRICT, YOGYAKARTA, INDONESIA. *Afr J Infect Dis*. 7 mars 2018;12(1 Suppl):13-25.
119. Rijal KR, Adhikari B, Ghimire B, Dhungel B, Pyakurel UR, Shah P, et al. Epidemiology of dengue virus infections in Nepal, 2006–2019. *Infect Dis Poverty*. 15 avr 2021;10:52.
120. Messina JP, Brady OJ, Golding N, Kraemer MUG, Wint GRW, Ray SE, et al. The current and future global distribution and population at risk of dengue. *Nat Microbiol*. 2019;4(9):1508-15.
121. Disentangling associations between vegetation greenness and dengue in a Latin American city: Findings and challenges. *Landsc Urban Plan*. 1 déc 2021;216:104255.
122. Nasir IA, Dangana A, Ahmad AE, Ojeamiren I, Emeribe AU. Chapter 2 - Human Reemerging Arboviral Diseases of the Late 21st Century: From Ecological-Epidemiology to Control Strategies. Dans: Ennaji MM, éditeur. *Emerging and Reemerging Viral Pathogens* [Internet]. Academic Press; 2020 [cité 12 avr 2022]. p. 9-33. Disponible à: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128194003000028>
123. Guha-Sapir D, Schimmer B. Dengue fever: new paradigms for a changing epidemiology. *Emerg Themes Epidemiol*. 2 mars 2005;2(1):1.
124. Vargas WP, Kawa H, Sabroza PC, Soares VB, Honório NA, de Almeida AS. Association among house infestation index, dengue incidence, and sociodemographic indicators: surveillance using geographic information system. *BMC Public Health*. 5 août 2015;15(1):746.
125. Vannavong N, Seidu R, Stenström TA, Dada N, Overgaard HJ. Effects of socio-demographic characteristics and household water management on *Aedes aegypti* production in suburban and rural villages in Laos and Thailand. *Parasit Vectors*. 4 avr 2017;10(1):170.
126. Coelho GE. Dengue: desafios atuais. *Epidemiol E Serviços Saúde*. sept 2008;17(3):231-3.
127. Sanna M, Hsieh YH. Ascertaining the impact of public rapid transit system on spread of dengue in urban settings. *Sci Total Environ*. 15 nov 2017;598:1151-9.
128. Reiter P, Lathrop S, Bunning M, Biggerstaff B, Singer D, Tiwari T, et al. Texas Lifestyle Limits Transmission of Dengue Virus. *Emerg Infect Dis*. janv 2003;9(1):86-9.
129. Troyo A, Fuller DO, Calderón-Arguedas O, Solano ME, Beier JC. Urban structure and dengue fever in Puntarenas, Costa Rica. *Singap J Trop Geogr*. 1 juill 2009;30(2):265-82.

130. Eritja R, Palmer JRB, Roiz D, Sanpera-Calbet I, Bartumeus F. Direct Evidence of Adult *Aedes albopictus* Dispersal by Car. *Sci Rep.* 24 oct 2017;7:14399.
131. Riad MH, Cohnstaedt LW, Scoglio CM. Risk Assessment of Dengue Transmission in Bangladesh Using a Spatiotemporal Network Model and Climate Data. *Am J Trop Med Hyg.* avr 2021;104(4):1444-55.
132. Carabali M, Harper S, Lima Neto AS, dos Santos de Sousa G, Caprara A, Restrepo BN, et al. Spatiotemporal distribution and socioeconomic disparities of dengue, chikungunya and Zika in two Latin American cities from 2007 to 2017. *Trop Med Int Health.* 2021;26(3):301-15.
133. Harapan H, Rajamoorthy Y, Anwar S, Bustamam A, Radiansyah A, Angraini P, et al. Knowledge, attitude, and practice regarding dengue virus infection among inhabitants of Aceh, Indonesia: a cross-sectional study. *BMC Infect Dis.* 27 févr 2018;18:96.
134. Dhimal M, Aryal KK, Dhimal ML, Gautam I, Singh SP, Bhusal CL, et al. Knowledge, Attitude and Practice Regarding Dengue Fever among the Healthy Population of Highland and Lowland Communities in Central Nepal. *PLoS ONE.* 9 juill 2014;9(7):e102028.
135. Shuaib F, Todd D, Campbell-Stennett D, Ehiri J, Jolly PE. Knowledge, attitudes and practices regarding dengue infection in Westmoreland, Jamaica. *West Indian Med J.* 2010;59(2):139-46.
136. Gonçalves Neto VS, Monteiro SG, Gonçalves AG, Rebêlo JMM. Conhecimentos e atitudes da população sobre dengue no Município de São Luís, Maranhão, Brasil, 2004. *Cad Saúde Pública.* oct 2006;22:2191-200.
137. Wong LP, Shakir SMM, Atefi N, AbuBakar S. Factors Affecting Dengue Prevention Practices: Nationwide Survey of the Malaysian Public. *PLoS ONE.* 2 avr 2015;10(4):e0122890.
138. Hairi F, Ong CHS, Suhaimi A, Tsung TW, bin Anis Ahmad MA, Sundaraj C, et al. A Knowledge, Attitude and Practices (KAP) Study on Dengue among Selected Rural Communities in the Kuala Kangsar District. *Asia Pac J Public Health.* 1 janv 2003;15(1):37-43.
139. Van Benthem BHB, Khantikul N, Panart K, Kessels PJ, Somboon P, Oskam L. Knowledge and use of prevention measures related to dengue in northern Thailand. *Trop Med Int Health.* 2002;7(11):993-1000.
140. Jayawickreme KP, Jayaweera DK, Weerasinghe S, Warapitiya D, Subasinghe S. A study on knowledge, attitudes and practices regarding dengue fever, its prevention and management among dengue patients presenting to a tertiary care hospital in Sri Lanka. *BMC Infect Dis.* 20 sept 2021;21:981.
141. Suwanbamrung C, Saengsuwan B, Sangmanee T, Thrikaew N, Srimoung P, Maneerattanasak S. Knowledge, attitudes, and practices towards dengue prevention among primary school

- children with and without experience of previous dengue infection in southern Thailand. *One Health*. 1 déc 2021;13:100275.
142. Shim E. Cost-effectiveness of dengue vaccination in Yucatán, Mexico using a dynamic dengue transmission model. *PLOS ONE*. 5 avr 2017;12(4):e0175020.
  143. Arkin F. Dengue researcher faces charges in vaccine fiasco. *Science*. 26 avr 2019;364(6438):320.
  144. FDA approves the first vaccine for dengue fever, but with major restrictions [Internet]. *STAT*. 2019 [cité 1 nov 2021]. Disponible à: <https://www.statnews.com/2019/05/01/fda-dengue-vaccine-restrictions/>
  145. McMahon E, Encinales L, Navarro Encinales C, Vielma S, Pacheco N, Avendaño Echavez LG, et al. A Dengue Vaccine: Will It be Accepted and Is It Feasible? Lessons from Barranquilla, Colombia, and Merida, Venezuela. *Microorganisms*. 16 oct 2019;7(10):458.
  146. Nguyen-Tien T, Do DC, Le XL, Dinh TH, Lindeborg M, Nguyen-Viet H, et al. Risk factors of dengue fever in an urban area in Vietnam: A case-control study. *BMC Public Health* [Internet]. 7 avr 2021 [cité 25 juin 2022]; Disponible à: <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/113263>
  147. Lwande OW, Obanda V, Lindström A, Ahlm C, Evander M, Näslund J, et al. Globe-Trotting *Aedes aegypti* and *Aedes albopictus*: Risk Factors for Arbovirus Pandemics. *Vector Borne Zoonotic Dis*. 1 févr 2020;20(2):71-81.
  148. Rather IA, Parray HA, Lone JB, Paek WK, Lim J, Bajpai VK, et al. Prevention and Control Strategies to Counter Dengue Virus Infection. *Front Cell Infect Microbiol*. 25 juill 2017;7:336.
  149. Spatial correlation of incidence of dengue with socioeconomic, demographic and environmental variables in a Brazilian city. *Sci Total Environ*. 15 avr 2008;393(2-3):241-8.
  150. Gubler DJ. Dengue and Dengue Hemorrhagic Fever. *Clin Microbiol Rev*. juill 1998;11(3):480-96.
  151. Abbas A, Abbas RZ, Khan JA, Iqbal Z, Bhatti MMH, Sindhu Z u D, et al. Integrated Strategies for the Control and Prevention of Dengue Vectors with Particular Reference to *Aedes aegypti*. *Pak Vet J*. 2014;10.
  152. Andersson N, Nava-Aguilera E, Arostegui J, Morales-Perez A, Suazo-Laguna H, Legorreta-Soberanis J, et al. Evidence based community mobilization for dengue prevention in Nicaragua and Mexico (Camino Verde, the Green Way): cluster randomized controlled trial. *The BMJ*. 8 juill 2015;351:h3267.
  153. Suarez R, Olarta MF, Ana MFA, Gonzalez C. Is what I have just a cold or is it dengue? Addressing the gap between the politics of dengue control and daily life in Villavicencio-Colombia. *Soc Sci Med*. 1 juill 2005;61(2):495-502.

154. Liew C, Soh LT, Chen I, Ng LC. Public sentiments towards the use of Wolbachia-Aedes technology in Singapore. *BMC Public Health*. 18 juill 2021;21:1417.
155. Bian G, Xu Y, Lu P, Xie Y, Xi Z. The Endosymbiotic Bacterium Wolbachia Induces Resistance to Dengue Virus in *Aedes aegypti*. *PLoS Pathog*. 1 avr 2010;6(4):e1000833.
156. Moreira LA, Iturbe-Ormaetxe I, Jeffery JA, Lu G, Pyke AT, Hedges LM, et al. A Wolbachia Symbiont in *Aedes aegypti* Limits Infection with Dengue, Chikungunya, and Plasmodium. *Cell*. 24 déc 2009;139(7):1268-78.
157. Ranathunge T, Harishchandra J, Maiga H, Bouyer J, Gunawardena YINS, Hapugoda M. Development of the Sterile Insect Technique to control the dengue vector *Aedes aegypti* (Linnaeus) in Sri Lanka. *PLoS ONE*. 4 avr 2022;17(4):e0265244.
158. La stérilisation des moustiques : une nouvelle solution pour lutter contre le chikungunya, la dengue et la maladie à virus Zika [Internet]. [cité 19 juin 2022]. Disponible à : <https://www.who.int/fr/news/item/14-11-2019-mosquito-sterilization-offers-new-opportunity-to-control-chikungunya-dengue-and-zika>
159. OCMVCD. Learn More about Genetically Modified Mosquitoes [Internet]. Orange County Mosquito and Vector Control District. [cité 19 juin 2022]. Disponible à : <https://www.ocvector.org/learn-more-about-genetically-modified-mosquitoes>
160. Karunaratne SHPP, Weeraratne TC, Perera MDB, Surendran SN. Insecticide resistance and efficacy of space spraying and larviciding in the control of dengue vectors *Aedes aegypti* and *Aedes albopictus* in Sri Lanka. *Pestic Biochem Physiol*. 1 sept 2013;107(1):98-105.
161. Du Y, Nomura Y, Satar G, Hu Z, Nauen R, He SY, et al. Molecular evidence for dual pyrethroid-receptor sites on a mosquito sodium channel. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 16 juill 2013;110(29):11785-90.
162. Wilke ABB, Vasquez C, Carvajal A, Ramirez M, Cardenas G, Petrie WD, et al. Effectiveness of adulticide and larvicide in controlling high densities of *Aedes aegypti* in urban environments. *PLOS ONE*. 25 janv 2021;16(1):e0246046.
163. CDC. Adulticides | CDC [Internet]. Centers for Disease Control and Prevention. 2020 [cité 16 juin 2022]. Disponible à : <https://www.cdc.gov/mosquitoes/mosquito-control/athome/outside-your-home/adulticides.html>
164. Fernando SD, Hapugoda M, Perera R, Saavedra-Rodriguez K, Black WC, De Silva NK. First report of V1016G and S989P knockdown resistant (kdr) mutations in pyrethroid-resistant Sri Lankan *Aedes aegypti* mosquitoes. *Parasit Vectors*. 26 sept 2018;11:526.
165. Vontas J, Kioulos E, Pavlidi N, Morou E, della Torre A, Ranson H. Insecticide resistance in the major dengue vectors *Aedes albopictus* and *Aedes aegypti*. *Pestic Biochem Physiol*. 1 oct 2012;104(2):126-31.

166. Liu T, Xie YG, Lin F, Xie LH, Yang WQ, Su XH, et al. A long-lasting biological larvicide against the dengue vector mosquito *Aedes albopictus*. *Pest Manag Sci.* 2021;77(2):741-8.
167. Genetic elimination of dengue vector mosquitoes [Internet]. [cité 19 juin 2022]. Disponible à: <http://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1019295108>
168. Géographie de la Colombie - Aventure Colombia [Internet]. 2021 [cité 10 avr 2022]. Disponible à: <https://aventurecolombia.com/geographie-colombie/>
169. Colombia Facts | Britannica [Internet]. [cité 13 nov 2021]. Disponible à: <https://www.britannica.com/facts/Colombia>
170. Colombia - La Violencia, dictatorship, and democratic restoration | Britannica [Internet]. 2022 [cité 10 avr 2022]. Disponible à: <https://www.britannica.com/place/Colombia>
171. Colombie 2022 [Internet]. *countryeconomy.com*. [cité 20 janv 2022]. Disponible à: <https://fr.countryeconomy.com/pays/colombie>
172. Colombia Population and Demographics from Colombia | - CountryReports [Internet]. [cité 11 avr 2022]. Disponible à: <https://www.countryreports.org/country/Colombia/population.htm>
173. DANE - Informacion para todos. Censo nacional de Poblacion y vivienda (Meta) [Internet]. 2018 [cité 17 déc 2021]. Disponible à: <https://www.dane.gov.co/index.php>
174. Canada Population (2022) - Worldometer [Internet]. [cité 11 avr 2022]. Disponible à: <https://www.worldometers.info/world-population/canada-population/>
175. Colombia population (2022) live — Countrymeters [Internet]. [cité 11 avr 2022]. Disponible à: <https://countrymeters.info/en/Colombia>
176. Hurtado DA. Socioeconomic Disparities in Subjective Well-being in Colombia. Dans: Rojas M, éditeur. *Handbook of Happiness Research in Latin America* [Internet]. Dordrecht: Springer Netherlands; 2016 [cité 10 avr 2022]. p. 343-56. Disponible à: [https://doi.org/10.1007/978-94-017-7203-7\\_20](https://doi.org/10.1007/978-94-017-7203-7_20)
177. UNESCO. Colombie [Internet]. 2016 [cité 10 avr 2022]. Disponible à: <http://uis.unesco.org/fr/country/co>
178. World Bank. *The World Bank Group A to Z 2016* [Internet]. The World Bank; 2015 [cité 10 avr 2022]. Disponible à: <http://elibrary.worldbank.org/doi/book/10.1596/978-1-4648-0484-7>
179. World Bank. GINI Index for Colombia [Internet]. FRED, Federal Reserve Bank of St. Louis. FRED, Federal Reserve Bank of St. Louis; 1980 [cité 11 juin 2022]. Disponible à: <https://fred.stlouisfed.org/series/SIPOVGINICOL>



180. International Citizens Insurance. Colombia Healthcare System [Internet]. International Citizens Insurance. [cité 11 avr 2022]. Disponible à: <https://www.internationalinsurance.com/health/systems/colombia.php>
181. Rodriguez RC, Galera-Gelvez K, Yescas JGL, Rueda-Gallardo JA. Costs of Dengue to the Health System and Individuals in Colombia from 2010 to 2012. *Am J Trop Med Hyg.* 1 avr 2015;92(4):709-14.
182. Méndez JA, Usme-Ciro JA, Domingo C, Rey GJ, Sánchez JA, Tenorio A, et al. Phylogenetic reconstruction of dengue virus type 2 in Colombia. *Virol J.* 9 mars 2012;9(1):64.
183. Restrepo AC, Baker P, Clements ACA. National spatial and temporal patterns of notified dengue cases, Colombia 2007–2010. *Trop Med Int Health.* 2014;19(7):863-71.
184. Martínez-Bello DA, López-Quílez A, Torres Prieto A. Relative risk estimation of dengue disease at small spatial scale. *Int J Health Geogr.* 15 août 2017;16:31.
185. 13 Time Series Forecasting [Internet]. [cité 23 févr 2023]. Disponible à: [https://digfir-published.macmillanusa.com/psbe4e/psbe4e\\_ch13\\_11.html](https://digfir-published.macmillanusa.com/psbe4e/psbe4e_ch13_11.html)
186. Watkins RE, Eagleson S, Veenendaal B, Wright G, Plant AJ. Disease surveillance using a hidden Markov model. *BMC Med Inform Decis Mak.* 10 août 2009;9(1):39.
187. Meta, Colombia - South America [Internet]. [cité 16 déc 2022]. Disponible à: <https://www.colombia-sa.com/departamentos/meta/meta-in.html>
188. Climate and average monthly weather in Meta, Colombia [Internet]. World Weather & Climate Information. [cité 10 avr 2022]. Disponible à: <https://weather-and-climate.com:80/average-monthly-Rainfall-Temperature-Sunshine-region-meta-co,Colombia>
189. Atmospheric Pressure | National Geographic Society [Internet]. [cité 19 sept 2022]. Disponible à: <https://education.nationalgeographic.org/resource/atmospheric-pressure>
190. Nasri BR, Boucher É, Perreault L, Rémillard BN, Huard D, Nicault A, et al. Modeling Hydrological Inflow Persistence Using Paleoclimate Reconstructions on the Québec-Labrador (Canada) Peninsula. *Water Resour Res.* 2020;56(5):e2019WR025122.
191. Nasri BR, Remillard B, Thioub M. Goodness-of-fit tests and regime selection procedures for general autoregressive hidden Markov Models with covariates. 2022;
192. Gasparrini A, Armstrong B, Kenward MG. Distributed lag non-linear models. *Stat Med.* 20 sept 2010;29(21):2224-34.
193. Remillard BRN and BN. GaussianHMM1d: Inference, Goodness-of-Fit and Forecast for Univariate Gaussian Hidden Markov Models [Internet]. 2019 [cité 21 nov 2022]. Disponible à: <https://CRAN.R-project.org/package=GaussianHMM1d>

194. Modeling Hydrological Inflow Persistence Using Paleoclimate Reconstructions on the Québec-Labrador (Canada) Peninsula - Nasri - 2020 - Water Resources Research - Wiley Online Library [Internet]. [cité 21 nov 2022]. Disponible à: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2019WR025122>
195. Seasonal Variations: Estimation - Basic Statistics and Data Analysis [Internet]. [cité 17 déc 2022]. Disponible à: <https://itfeature.com/time-series-analysis-and-forecasting/estimation-of-seasonal-variations>
196. Morin CW, Sellers S, Ebi KL. Seasonal variations in dengue virus transmission suitability in the Americas. *Environ Res Lett.* juin 2022;17(6):064042.
197. Morales I, Salje H, Saha S, Gurley ES. Seasonal Distribution and Climatic Correlates of Dengue Disease in Dhaka, Bangladesh. *Am J Trop Med Hyg.* 1 juin 2016;94(6):1359-61.
198. Wongkoon S, Jaroensutasinee M, Jaroensutasinee K. Distribution, seasonal variation & dengue transmission prediction in Sisaket, Thailand. *Indian J Med Res.* sept 2013;138(3):347-53.
199. Do you want to know how the is weather in Colombia? [Internet]. [cité 17 déc 2021]. Disponible à: <https://colombia.travel/en/blog/do-you-want-know-how-weather-in-colombia>
200. Gómez Gómez RE, Kim J, Hong K, Jang JY, Kisiju T, Kim S, et al. Association between Climate Factors and Dengue Fever in Asuncion, Paraguay: A Generalized Additive Model. *Int J Environ Res Public Health.* 26 sept 2022;19(19):12192.
201. Chen Y, Zhao Z, Li Z, Li W, Li Z, Guo R, et al. Spatiotemporal Transmission Patterns and Determinants of Dengue Fever: A Case Study of Guangzhou, China. *Int J Environ Res Public Health.* juill 2019;16(14):2486.
202. Tran BL, Tseng WC, Chen CC, Liao SY. Estimating the Threshold Effects of Climate on Dengue: A Case Study of Taiwan. *Int J Environ Res Public Health.* févr 2020;17(4):1392.
203. Wu PC, Lay JG, Guo HR, Lin CY, Lung SC, Su HJ. Higher temperature and urbanization affect the spatial patterns of dengue fever transmission in subtropical Taiwan. *Sci Total Environ.* 15 mars 2009;407(7):2224-33.
204. Weather Factors Associated with Reduced Risk of Dengue Transmission in an Urbanized Tropical City - PubMed [Internet]. [cité 20 nov 2022]. Disponible à: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35010600/>
205. Singh PS, Chaturvedi HK. A retrospective study of environmental predictors of dengue in Delhi from 2015 to 2018 using the generalized linear model. *Sci Rep.* 16 mai 2022;12(1):8109.
206. Benedum CM, Seidahmed OME, Eltahir EAB, Markuzon N. Statistical modeling of the effect of rainfall flushing on dengue transmission in Singapore. *PLoS Negl Trop Dis.* 6 déc 2018;12(12):e0006935.

207. Carabali M, Jaramillo-Ramirez GI, Rivera VA, Possu NJM, Restrepo BN, Zinszer K. Assessing the reporting of Dengue, Chikungunya and Zika to the National Surveillance System in Colombia from 2014–2017: A Capture-recapture analysis accounting for misclassification of arboviral diagnostics. *PLoS Negl Trop Dis*. 4 févr 2021;15(2):e0009014.
208. Rico-Mendoza A, Porrás-Ramírez A, Chang A, Encinales L, Lynch R. Authors' response to the letter to the editor entitled: Co-circulation of dengue, chikungunya, and Zika viruses and cross-protection. *Rev Panam Salud Pública*. 22 août 2019;43:e77.
209. Mora-Salamanca AF, Porrás-Ramírez A, De la Hoz Restrepo FP. Estimating the burden of arboviral diseases in Colombia between 2013 and 2016. *Int J Infect Dis*. 1 août 2020;97:81-9.
210. Dayan G, Arredondo JL, Carrasquilla G, Deseda CC, Dietze R, Luz K, et al. Prospective Cohort Study with Active Surveillance for Fever in Four Dengue Endemic Countries in Latin America. *Am J Trop Med Hyg*. 8 juill 2015;93(1):18-23.
211. Laiton-Donato K, Alvarez DA, Peláez-Carvajal D, Mercado M, Ajami NJ, Bosch I, et al. Molecular characterization of dengue virus reveals regional diversification of serotype 2 in Colombia. *Virol J*. 8 mai 2019;16(1):62.
212. Freitas LP, Carabali M, Yuan M, Jaramillo-Ramirez GI, Balaguera CG, Restrepo BN, et al. Spatio-temporal clusters and patterns of spread of dengue, chikungunya, and Zika in Colombia. *PLoS Negl Trop Dis*. 23 août 2022;16(8):e0010334.
213. Vong S, Goyet S, Ly S, Ngan C, Huy R, Duong V, et al. Under-recognition and reporting of dengue in Cambodia: a capture–recapture analysis of the National Dengue Surveillance System. *Epidemiol Infect*. mars 2012;140(3):491-9.
214. Shepard DS, Undurraga EA, Lees RS, Halasa Y, Lum LCS, Ng CW. Use of Multiple Data Sources to Estimate the Economic Cost of Dengue Illness in Malaysia. *Am J Trop Med Hyg*. 7 nov 2012;87(5):796-805.
215. Zhang Z, Manjourides J, Cohen T, Hu Y, Jiang Q. Spatial measurement errors in the field of spatial epidemiology. *Int J Health Geogr*. 1 juill 2016;15:21.
216. Zinszer K, Kigozi R, Charland K, Dorsey G, Brewer TF, Brownstein JS, et al. Forecasting malaria in a highly endemic country using environmental and clinical predictors. *Malar J*. 18 juin 2015;14(1):245.
217. Zinszer K, Kigozi R, Charland K, Dorsey G, Brewer TF, Brownstein JS, et al. Forecasting malaria in a highly endemic country using environmental and clinical predictors. *Malar J*. 18 juin 2015;14(1):245.
218. Zhang Z, Manjourides J, Cohen T, Hu Y, Jiang Q. Spatial measurement errors in the field of spatial epidemiology. *Int J Health Geogr*. 1 juill 2016;15:21.

## Annexe A. Marges de températures ambiantes favorables à la dengue

Le tableau suivant cite des valeurs de températures ambiantes rendant convenable la propagation de la dengue fixées par les études prises en compte dans notre revue de littérature. À noter que ces études ne sont pas propres à une région géographique unique, mais bien tout environnement ayant été propice à la transmission de la maladie.

<b>Étude</b>	<b>Température convenable à la propagation de la dengue (°C)</b>
<b>Gomes et al., 2012</b>	>26°C
<b>Teurlai et al., 2015</b>	22 - 25°C
<b>Wu et al., 2009</b>	≥18°C
<b>Helmersson et al., 2014</b>	29.3°C
<b>Karim et al., 2012</b>	26 - 28 - 30°C
<b>Hii et al., 2009</b>	27.8°C
<b>Zhu et al., 2019</b>	>18°C
<b>Xiang et al., 2017</b>	21.6 –32.9 °C
<b>Susilawatu et al., 2021</b>	23-25°C
<b>Chen et al., 2019</b>	22-28°C
<b>Chen et Hsieh, 2012</b>	28°C
<b>Wu et al., 2007</b>	15 – 35°C
<b>Abdelkrim et al., 2021</b>	17-27°C
<b>Lambrechts et al., 2011</b>	<18°C
<b>Shabbir et al., 2020</b>	30°C
<b>Mordecai et al., 2017</b>	26-29°C

## Annexe B. Liste des municipalités du département Méta

Municipalité
Villavicencio
Acacías
Barranca de Upía
Cabuyaro
Castilla la Nueva
Cubarral
Cumaral
El Calvario
El Castillo
El Dorado
Fuente de Oro
Granada
Guamal
Mapiripán
Mesetas
La Macarena
Uribe
Lejanías
Puerto Concordia
Puerto Gaitán
Puerto López
Puerto Lleras
Puerto Rico
Restrepo
San Carlos de Guaroa
San Juan de Arama
San Juanito
San Martín
Vistahermosa

## Annexe C. Puissance des tests

La première expérience consiste à simuler des données selon une loi de Poisson à deux régimes, avec les paramètres obtenus pour la ville de Villavicencio, en utilisant les covariables Précipitation et Humidité pour une taille d'échantillon de 468 comme dans les données utilisées. La matrice de

transition entre les régimes est  $Q = \begin{pmatrix} 0.9071 & 0.0929 \\ 0.0454 & 0.9546 \end{pmatrix}$ . Si  $X_{t1}$  représente la précipitation et  $X_{t2}$

représente l'humidité, alors les moyennes des deux régimes au temps  $t$  sont :

$$\mu_{t1} = 98.5108 + 3.0784X_{t1} + \beta \times 6.0117X_{t2},$$

$$\mu_{t2} = 29.1669 + 0.1896X_{t1} + \beta \times 0.9142X_{t2},$$

où  $\beta \in \{0.25, 0.5, 1, 2, 3, 4\}$ . On teste ensuite l'hypothèse nulle de modèle de Poisson à deux régimes avec seulement comme covariable Précipitation, ce qui veut dire que  $H_0$  est  $\beta = 0$ . La puissance est calculée à partir du pourcentage de rejets de  $H_0$  parmi  $N = 100$  expériences, pour un seuil de 5%. Le cas  $\beta = 0$  donnerait environ 5% qui est le niveau du test ou le seuil. Les résultats de puissance de tests pour des valeurs alternatives de  $\beta \in \{0.25, 0.5, 1, 2, 3, 4\}$  sont les suivants :

$\beta$	0.25	0.5	1	2	3	4
Puissance (%)	16	27	34	62	72	89

On peut conclure que le test est consistant et que la puissance est relativement élevée atteignant 60% à 90% pour des différences  $\beta$  assez petites.

La seconde expérience consiste à simuler des données selon une loi binomiale négative (voir ci-dessous) à deux régimes, avec paramètres

$$\mu_{t1} = 98.4992 + 3.0788X_{t1},$$

$$\mu_{t2} = 29.1621 + 0.1898X_{t1},$$

pour chacun des régimes, et  $\delta_{i1} = \frac{3}{\gamma}$  et  $\delta_{i2} = \frac{4}{\gamma}$ , avec  $\gamma \in \{0.0001, 0.01, 0.03, 0.04, 0.05, 0.1\}$ . On teste ensuite l'hypothèse nulle de modèle de Poisson à deux régimes avec la covariable Précipitation. Cela revient à tester  $H_0 : \gamma = 0$

La puissance est calculée à partir du pourcentage de rejets de  $H_0$  parmi  $N = 100$  expériences, pour un seuil de 5%. Le cas  $\gamma = 0$  (donne la loi de poisson) donnerait environ 5%.

$\gamma$	0.0001	0.01	0.03	0.04	0.05	0.1
Puissance (%)	19	28	48	60	81	100

## 1. Binomiale négative

Une loi binomiale négative est la loi d'une variable aléatoire qui est une loi de Poisson avec une intensité aléatoire distribuée selon une loi Gamma de paramètres  $(\delta, m)$ , où  $\delta, m > 0$ . La densité est donnée par

$$f_{\delta, \mu}(k) = \left( \frac{\delta}{\delta + \mu} \right)^\delta \left( \frac{\mu}{\delta + \mu} \right)^k \frac{\Gamma(\delta + k)}{k! \Gamma(\delta)}, \quad k \geq 0,$$

où  $m = \frac{\mu}{\delta}$ . Lorsque  $\delta$  devient grand, la loi binomiale négative devient presque une loi de Poisson.

## Annexe D. Description détaillée de la méthodologie

Les modèles considérés sont des modèles de Poisson avec 4 changements de régimes. Ces régimes, dénotés  $T_t \in \{1, 2, 3, 4\}$  ne sont pas observables et sont distribués selon une chaîne de Markov de matrice de transition  $Q$ , i.e., que  $P(T_t = j | T_{t-1} = i) = Q_{ij}$ ,  $i, j \in \{1, 2, 3, 4\}$ . De plus, étant donné une covariable  $X_t = x$  non-négative, et étant donné le régime  $T_t = i$ , la loi du nombre de cas de dengue  $Y_t$  à la période  $t$ , dans une région donnée, est une loi de Poisson de moyenne  $\lambda_i(t) = \alpha_i + \beta_i x$ .

Ici, les choix de la covariable sont donnés par les précipitations, l'humidité, la pression atmosphérique, et la température moyenne, pour des délais de 0 à 20 jours, ce qui donne 84 cas possibles de covariables.

Pour chacune de ces 84 covariables, on a calculé la moyenne à long terme, i.e., en supposant que la loi des régimes est la loi stationnaire  $\pi$  associée à la matrice de transition  $Q$ ; autrement dit,  $\pi$  est l'unique solution de  $Q^T \pi = \pi$ , avec  $\pi_1 + \pi_2 + \pi_3 + \pi_4 = 1$ . La moyenne est donnée par

$$\mu_x = E(Y | X = x) = \alpha + \beta x,$$

$$\text{où } \alpha = \sum_{i=1}^4 \pi_i \alpha_i \quad \text{et } \beta = \sum_{i=1}^4 \pi_i \beta_i .$$

Autrement dit, la moyenne est une moyenne pondérée par les poids des régimes à long terme.

L'estimation des paramètres  $Q$ ,  $\alpha_1, \dots, \alpha_4$ ,  $\beta_1, \dots, \beta_4$  de ces 84 modèles est basé sur Nasri et al. (2022). Même si les régimes ne sont pas observables, ils peuvent être prévus. En fait, on peut calculer  $n_i(i) = P(T_t = i | Y_1, \dots, Y_t, X_1, \dots, X_t)$ . À partir de calculer préliminaires basés sur des tests d'adéquation proposés dans Nasri et al. (2022), il a été déterminé que 4 régimes suffisaient à bien modéliser le nombre de cas de dengue, en se basant sur un seuil de signification de 5%. Il faut toutefois noter que dans certains cas, 2 ou 3 régimes auraient été suffisants, mais cela était assez rare, tandis que les tests d'adéquation avec 4 régimes étaient presque toujours acceptables.



Finalemment, le calcul des RR a été fait de la façon suivante, similairement à ce qui est fait dans le cas d'une régression linéaire: pour une valeur  $x$  de la covariable  $X$ , on a

$$RR_x = \frac{\mu_x}{\mu_{\bar{x}}},$$

où  $\bar{x}$  est la moyenne de covariable  $X$ . Comme  $\alpha$  et  $\beta$  sont non-négatifs,  $RR_x$  est une fonction non-décroissante en  $x$ , pour un délai fixé. Elle est constante si  $\beta_1$  est très faible pour chaque régime. On voit que cela arrive pour plusieurs régions pour la pression atmosphérique.