

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В КОНЦЕ 21 ВЕКА НА ПРОДУКТИВНОСТЬ САХАРНОГО ТРОСТНИКА В ШТАТЕ ВЕРАКРУС МЕКСИКИ

Никольский Ю.Н.

Краткое содержание

Мексика занимает шестое место в мире по производству сахарного тростника. Штат Веракрус занимает первое место по производству этой культуры. Исследования, проведенные в различных странах мира, показывают, что влияние изменения климата в 21 веке может быть положительным или отрицательным, в зависимости от особенностей распределения температуры и осадков в течение года. Работы такого типа, проведенные в Мексике, в основном были основаны на качественном анализе взаимосвязи отдельных климатических факторов и продуктивности сельскохозяйственных культур. Целью настоящего исследования является количественная оценка ожидаемого изменения урожайности богарного сахарного тростника в штате Веракрус на основе существующих сценариев изменения климата в конце 21 века, используя предложенную IIASA/FAO (2012) модель развития этой культуры с учетом биологических, климатических и почвенных факторов. Результаты показывают, что при увеличении содержания CO₂ в атмосфере в 2 или 2,7 раза и сохранении существующих сортов культуры и технологии ее выращивания урожайность сахарного тростника может снизиться на 8-15% или увеличиться до 10 % в зависимости от сценария изменения климата. Анализ результатов расчетов показывает, что основным климатическим фактором, который окажет влияние на урожайность сахарного тростника, являются осадки. Для уменьшения возможного отрицательного влияния на урожайность изменения режима выпадения осадков в будущем рекомендуется улучшить технологию регулирования поверхностного стока.

Ключевые слова: расчет урожайности, радиационный индекс сухости, интегральный индекс плодородия почвы, сценарии изменения климата.

Введение

Сахарный тростник (*Saccharum officinarum*) считается важной культурой Мексики. Страна занимает шестое место в мире по выращиванию сахарного тростника (больше имеют Бразилия, Индия, КНР, Пакистан и Таиланд), производя 56 миллионов тонн сахарного тростника в год; при этом штат Веракрус занимает первое место в стране, получая 20 млн тонн (SIAP, 2017). Более 50% этой культуры в штате Веракрус выращивается в условиях богарного земледелия.

Несмотря на то, что сахарный тростник является важной культурой в Мексике и существуют программы поддержки производителей, направленные на увеличение его производства, имеется сравнительно мало исследований в этой стране по оценке влияния на эту культуру возможного изменения климата в 21 веке. Согласно исследованиям, проведенным в нескольких странах мира, изменение климата может существенно повлиять на продуктивность сахарного тростника прежде всего на богарных землях (Bravo-Mosqueda *et al.*, 2012; Srivastava, Mahendra, 2012; Fernandez, 2013; Marin *et al.*, 2013; OIA, 2013; Guerra, Hernandez, 2014; Duli, Yang-Rui, 2015; Sifontes, 2016, Linnenluecke, Nucifora, Thomson, 2018). Эти исследования проводились на основе: сравнительного анализа данных в прошлом об изменении климата и урожайности, регрессионных моделей по оценке роли различных факторов возделывания сахарного тростника (таких как технология, сорт, температура воздуха, осадки, сроки посадки и уборки) на стоимость произведенной продукции, эмпирических моделей связи между продуктивностью и отдельными климатическими показателями.

В исследованиях, основанных на моделировании процесса развития сахарного тростника, не использовалась теоретическая модель физиологических особенностей развития сельскохозяйственных культур, предложенная FAO (2018). Кроме того, не учитывалось возможное изменение плодородия почвы, связанное с самим изменением климата, и его влияние на урожайность сахарного тростника. В некоторых публикациях указывается, что изменение плодородия почв вследствие длительного глобального изменения климата может оказать дополнительное влияние до 30% на урожайность некоторых сельскохозяйственных культур (Castillo *et al.*, 2007).

Поэтому целью данной работы была оценка влияние изменения климата на урожайность неорошаемого сахарного тростника в штате Веракрус к концу XXI века с использованием физиологической модели развития этой культуры (IASA/FAO, 2012 и FAO, 2018), учитывая как прямое влияние климата на урожай, так и косвенное влияние, связанное с изменением плодородия почвы вследствие изменения климата. Потенциальное воздействие изменения климата на вредителей и болезни не принималось во внимание, поскольку существующие математические модели, используемые в исследованиях для оценки воздействия изменяющегося климата на болезни и вредители сахарного тростника, являются эмпирическими (CEPAL-FAO, 2013; Donatelli *et al.*, 2017). То есть, они разработаны на основе наблюдений, проведенных на конкретных участках местности, поэтому они не репрезентативны для других регионов и климатических зон. Кроме того, гипотетически предполагается, что технология возделывания сахарного тростника в будущем будет совершенствоваться и достаточно эффективной для фитосанитарной защиты этой сельскохозяйственной культуры.

Материалы и методы

Данное исследование было выполнено для четырех территорий штата Веракрус, на которых производится основная масса сахарного тростника: Коатотолопан, Сан Кристобаль, Сан Педро и Трес Вайес (Таблица 1).

Таблица 1. Характеристика четырех территорий штата Веракрус, Мексика, на которых производится основная масса сахарного тростника.

Название территории	Площадь (га)	Высота над уровнем моря (м)	Основные группы почв
Коатотолопан	47417	10-200	Акрисоли, Камбисоли, Лювисоли, Вертисоли
Сан Кристобаль	123355	0-50	Камбисоли, Лювисоли, Глейсоли
Сан Педро	16748	10-570	Вертисоли, Камбисоли, Литосоли
Трес Вайес	55104	10-50	Камбисоли, Лювисоли, Вертисоли, Глейсоли

Среднемесячные метеорологические данные по температуре воздуха T , осадках Pr и суммарной радиации Rg для начала 21 века взяты с метеостанций, расположенных в районе каждой территории (ИМТА, 2016). Информация о группах почв по существующей классификации (FAO, 2006) на территориях сахарного тростника представлена в таблице 1. Данные о текстуре, площади и типичном содержании питательных веществ для каждой группы почв на территориях сахарного тростника получены из публикаций (INEGI, 1988; INEGI, 2004 и SIAP-COLPOS, 2009). Обработка информации по почвам была автоматизирована с помощью программного обеспечения ArcGis 10.0.

Данные о прогнозах изменения ежемесячных величин T , Pr и Rg в конце 21 века (2075-2099 гг.) были получены из публикаций (Cavazos *et al.*, 2013; Fernandez *et al.*, 2018) для моделей атмосферной циркуляции GFDL-CM3, HADGEM2-ES и MPI-ESM-LR для двух сценариев изменения концентрации CO_2 в атмосфере: 650 ppm и 1370 ppm. Интенсивность солнечной радиации в этот период рассматривалась 4,5 и 8,5 Вт/м². Выбор климатических прогнозов, сделанных с помощью этих моделей, был основан на рекомендации работы Cavazos *et al.* (2013) для оценок воздействия изменения климата на продуктивность земледелия, а также учитывая высокое пространственное разрешение этих моделей: 926 x 926 м в горизонтальной плоскости.

По климатическим прогнозам, в конце 21 века в этом регионе, в зависимости от местоположения, сценария изменения концентрации CO_2 в атмосфере и модели атмосферной циркуляции, ожидается повышение среднегодовой

температуры на 11-25% по сравнению с началом века, увеличение фотосинтетически активной радиации на 4-10%, уменьшение осадков на 5-12%.

Продолжительность развития сахарного тростника от посадки черенков до уборки урожая - 14-17 месяцев. Учитывая, что основной период прироста биомассы приходится на второй год – год уборки урожая – сафры и что задача данного исследования – оценить влияние глобального изменения климата на среднемноголетнюю урожайность сахарного тростника, используя при этом имеющиеся данные об оценочных среднемесячных климатических показателях для среднемноголетнего климатического года в конце 21 века, расчет урожайности велся для условного периода развития продолжительностью 12 месяцев (хотя, на самом деле, урожайность зависит от климатических условий всего цикла вегетации этой культуры, включающих и часть предыдущего года). Такой подход представляется допустимым для оценки годовой урожайности в среднемноголетнем разрезе.

Урожайность сахарного тростника (*Saccharum officinarum*) Y_{calc}^{2100} на конец (2075–2099 гг.) 21 века рассчитана по формуле, предложенной IIASA/FAO (2012) и FAO (2018):

$$Y_{calc}^j = \frac{1}{1-\gamma} F_a^j \sum_{i=1}^{12} (Y_{pot}^i K_{hydr}^i) \quad (1)$$

где $Y_{calc}^j = Y_{calc}^{2100}$ - среднемноголетняя продуктивность товарной сырой массы урожая (кг га⁻¹ год⁻¹) в условный год $j = 2100$; Y_{pot}^i – среднемесячный прирост потенциальной продуктивности товарной сухой массы урожая сахарного тростника (кг га⁻¹) в течение месяца i года $j = 2100$ в зависимости от среднемесячных величин температуры воздуха, фотосинтетической солнечной радиации и среднегодового содержания CO₂ в атмосфере (величина $i = 12$ принята условно для двухлетней культуры сахарного тростника как соответствующая средневзвешенному годовому приросту биомассы); K_{hydr}^j – среднемесячный водный коэффициент, зависящий от осадков и эвапотранспирации культуры и учитывающий влажность почвы в месяце i года $j = 2100$ (безразмерный, изменяющийся от 0 до 1); F_a^j - интегральный индекс плодородия сельскохозяйственной почвы на выбранной территории в конце 21 века; γ – коэффициент, соответствующий содержанию воды в единице сырой массы урожая (безразмерный, изменяющийся от 0 до 1).

Использованы среднемесячные оценочные климатические, представленные в работе (Fernandez *et al.*, 2018).

Товарная масса – это часть биомассы урожая, выращенного в поле, которая учитывается и используется на заводах для производства сахара.

Товарная потенциальная продуктивность сухой массы Y_{pot}^i соответствует случаю отсутствия ограничений для сельскохозяйственной культуры по воде и питательным веществам в почве, отсутствия вредителей и болезней. Урожайность Y_{calc}^{2000} сахарного тростника на начало 21 века рассчитывалась как среднееголетняя за период 2005–2015 гг., в котором для каждого года имелись среднемесячные необходимые климатические данные, данные о плодородии почв и данные о полученной ежегодной и среднееголетней урожайности, чтобы сравнить расчетные и фактические величины:

$$Y_{calc}^{2000} = \frac{\sum_{j=2005}^{2015} Y_{calc}^j}{11} \quad (2)$$

где F_a^{2000} – среднееголетний интегральный индекс плодородия сельскохозяйственной почвы на выбранной для анализа территории в начале 21 века; Y_{calc}^j рассчитывалась для каждого года $j = 2005, 2006 \dots 2015$ в указанном периоде 2005-2015 гг. по формуле аналогичной (1).

Относительное изменение урожайности сахарного тростника (δY_{calc}) на конец 21 века по сравнению с его началом определялось следующим образом:

$$\delta Y_{calc} = \frac{Y_{calc}^{2100}}{Y_{calc}^{2000}} \quad (3)$$

Для оценки доли компонентов Y_{pot} , K_{hidr} и F_a в рассчитанных среднееголетних величинах Y_{calc}^{2100} и Y_{calc}^{2000} эти компоненты условно оценивались так:

$$Y_{pot}^{2100} = \left(\sum_{i=1}^{12} Y_{pot}^i \right)_{2100} \text{ и } Y_{pot}^{2000} = \left[\sum_{j=2005}^{2015} \left(\sum_{i=1}^{12} Y_{pot}^{i,j} \right) \right] / 11 \quad (4)$$

То есть, как сумма месячных значений Y_{pot}^i для среднееголетних условий в конце 21 века и как средняя величина из месячных сумм за каждый год с 2005 по 2015 гг.

Величины F_a^{2100} и F_a^{2000} характерные для конца и начала 21 века по каждой выбранной территории является среднееголетней для этих периодов, так как изменение плодородия почвы под влиянием изменяющегося климата – процесс медленный, заметный в течение десятилетий (Arnold *et al.*, 1990). То есть, для периодов 2075-2099 гг. и 2005-2015 гг. соответствующих концу и началу 21 века однажды определяются величины F_a^{2100} и F_a^{2000} . Методика определения этих величин описывается ниже.

Величины K_{hidr}^{2100} и K_{hidr}^{2000} определяются так:

$$K_{hidr}^{2100} = \frac{Y_{calc}^{2100}}{Y_{pot}^{2100} * F_a^{2100}} \text{ и } K_{hidr}^{2000} = \frac{[(\sum_{j=2005}^{2015} Y_{calc}^j) / 11]}{Y_{pot}^{2000} * F_a^{2000}} \quad (5)$$

Поэтому условно можно представить среднегодовые величины Y_{calc}^{2100} и Y_{calc}^{2000} также таким образом:

$$Y_{calc}^{2100} = Y_{pot}^{2100} * K_{hidr}^{2100} * F_a^{2100} \text{ и } Y_{calc}^{2000} = Y_{pot}^{2000} * K_{hidr}^{2000} * F_a^{2000} \quad (6)$$

Относительное изменение этих компонентов урожайности в конце 21 века по сравнению с началом века оценивается так:

$$\delta Y_{pot} = \frac{Y_{pot}^{2100}}{Y_{pot}^{2000}}; \delta K_{hidr} = \frac{K_{hidr}^{2100}}{K_{hidr}^{2000}}; \delta F_a = \frac{F_a^{2100}}{F_a^{2000}} \quad (7)$$

а связь между δY_{calc} и ее компонентами записывается так:

$$\delta Y_{calc} = \delta Y_{pot} * \delta K_{hidr} * \delta F_a \quad (8)$$

Оценка потенциальной продуктивности Y_{pot}^j сделана по формуле IIASA/FAO (2012):

$$Y_{pot}^j = H * \sum_i^j \frac{0.36 b_{gm} \beta K_{CO2}}{\frac{1}{N} + 0.25 c_t} \quad (9)$$

где H – индекс урожая или доля сухой биомассы урожая, которая используется для производства сахара (безразмерная, меньше единицы); b_{gm} – максимально возможная интенсивность прироста сухой биомассы ($\text{кг га}^{-1} \text{сут}^{-1}$), когда относительная площадь листьев LAI в течение вегетационного периода достигает значения 5 (безразмерный); β – безразмерная зависимость между максимальным значением LAI в каждом последовательном месяце i и значением $LAI = 5$; K_{CO2} – коэффициент, учитывающий изменение продуктивности на протяжении 21 века относительно его начала в зависимости от сценария роста концентрации CO_2 в атмосфере (безразмерный, больше или равный единице); N – количество дней развития сельскохозяйственной культуры в каждом последовательном i -м месяце или его части; c_t – коэффициент, зависящий от температуры воздуха (сут^{-1}). Значения β и c_t рассчитывались следующим образом (IIASA/FAO, 2012):

$$\beta = 0.3424 + 0.9051 \text{Log}_{10}(LAI), \text{ если } LAI < 5 \text{ и } \beta = 1 \text{ si } LAI \geq 5 \quad (10)$$

$$c_t = 0.0108(0.0044 + 0.019T + 0.001T^2) \quad (11)$$

где T – среднемесячная температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$) за все месяцы года.

b_{gm} оценивается в зависимости от максимального прироста биомассы P_m (кг CH_2O га^{-1} час^{-1}) и некоторых параметров процесса фотосинтеза сельскохозяйственной культуры.

Если $P_m \geq 20$ кг CH_2O га^{-1} час^{-1} , то:

$$b_{gm} = \alpha(0.8 + 0.01P_m)b_0 + (1 - \alpha)(0.5 + 0.025P_m)b_c \quad (12)$$

Если $P_m < 20$ кг CH_2O га^{-1} час^{-1} , то:

$$b_{gm} = \alpha(0.5 + 0.025P_m)b_0 + (1 - \alpha)(0.05P_m)b_c \quad (13)$$

$$\alpha = (A_c - 0.24R_g)/(0.8A_c) \quad (14)$$

P_m зависит от температуры воздуха T и типа фотосинтеза; b_0 и b_c – интенсивность прироста сухой биомассы брутто, соответственно, в течение облачных и безоблачных дней (кг га^{-1} день^{-1}); A_c – максимальная коротковолновая солнечная радиация в течение безоблачных дней (кал см^{-2} день^{-1}); R_g – суммарная солнечная радиация (Вт м^{-2}).

Величины γ , N , LAI , H , P_m и K_{CO_2} для сахарного тростника получены из работ ПАСА/FAO (2012) и Allen *et al.* (2006), величины A_c , b_0 и b_c – из работ Driessen, Konijn (1992) и FAO (2016).

Водный коэффициент K_{hidr}^j определялся в зависимости от месячных величин осадков и эвапотранспирации по методике и формуле описанной в работах ПАСА/FAO (2012) и FAO (2018):

$$K_{hidr}^j = 1 - k^y \left(1 - \frac{ET_a^{pl}}{ET_0^{pl}} \right) \quad (15)$$

где k^y – коэффициент чувствительности растения к недостатку воды в почве (FAO, 2012); ET_a^{pl} – реальная интенсивность эвапотранспирации в зависимости от влажности почвы θ ; ET_0^{pl} – потенциальная интенсивность эвапотранспирации в случае отсутствия недостатка воды в почве.

Типичный характер зависимости ET_a^{pl}/ET_0^{pl} от влажности почвы θ в активном корнеобитаемом слое почвы выражается следующим образом:

$$\frac{ET_a^{pl}}{ET_0^{pl}} = \frac{\theta - PM}{CC - PM}, \text{ когда } PM \leq \theta \leq CC \text{ и } \frac{ET_a^{pl}}{ET_0^{pl}} = 1, \text{ когда } \theta \geq CC \quad (16)$$

где θ – объемная влажность почвы в активном корнеобитаемом слое почвы 0-20 см; CC и PM – соответственно, объемная влажность равная предельной полевой влагоемкости и влажности завядания.

Интегральный индекс плодородия F_a^{2000} на начало 21 века для каждого участка, для которого имелись данные по урожаям и по содержанию питательных веществ, рассчитывался по формуле, предложенной Пеговым и Хомяковым (1991):

$$F_a^{2000} = 0.46 \frac{MO}{MO_{max.}} + 0.28 \sqrt{\frac{P}{P_{max.}} \frac{K}{K_{max.}}} + 0.26 e^{-\left(\frac{pH-6}{2}\right)^2} \quad (17)$$

где MO , P , K и pH – модальные значения содержания, соответственно, органического вещества, доступных растениям форм фосфора и калия, и pH в слое 0-20 см; $MO_{max.}$, $P_{max.}$ и $K_{max.}$ – максимальные количества этих свойств среди всех имеющихся данных по различным участкам.

Значение F_a^j безразмерно и изменяется от 0 до 1: 0 соответствует полностью деградированной почве; 1 - почве с максимальным плодородием.

Для расчета урожайности сахарного тростника были проанализированы ежемесячные климатические данные начала 21 века за период 2005-2015 гг. и рассчитаны интегральные индексы плодородия почвы. По этим данным была рассчитана годовая продуктивность $Y_{pot}^{2005...2015}$. Рассчитанная урожайность сравнивалась с реальной продуктивностью, указанной в публикациях (Aguilar-Rivera, 2014; Flores-Granados, 2017; SIAP, 2017) и анализировалась регрессия между расчетной и наблюдаемой урожайностью.

Ежегодная урожайность Y_{calc}^{2000} , рассчитанная и осредненная за период с 2005 по 2015 гг. для каждой территории, сравнивалась с осредненной реальной урожайностью в эти годы Y_{obs}^{2000} . Такое сравнение было выполнено для величин относительной урожайности в долях от ее максимальной величины отдельно для рассчитанной $Y_{calc}^{2000}/Y_{calc\ max}^{2000}$ и реальной $Y_{obs}^{2000}/Y_{obs\ max}^{2000}$ по каждой территории. Это было сделано, чтобы по возможности уменьшить случайные ошибки, связанные процессом расчета и учета урожайности.

Потом с учетом параметров уравнений регрессии для связи между $Y_{calc}^{2000}/Y_{calc\ max}^{2000}$ и $Y_{obs}^{2000}/Y_{obs\ max}^{2000}$ были введены поправки на рассчитанные урожайности $Y_{calc}^{2100}/Y_{calc\ max}^{2100}$ и Y_{calc}^{2100} на конец 21 века и оценено относительное изменение урожайности $\delta Y_{calc} = \frac{Y_{calc}^{2100}}{Y_{calc}^{2000}}$.

Ожидаемое изменение плодородия сельскохозяйственных почв в конце 21 века в результате изменения климата оценивалось с использованием методики, разработанной в публикациях (Nikolskii *et al.*, 2006; Castillo *et al.*, 2007). Эта методика основана на использовании установленной ранее количественной связи между региональными модальными значениями

интегрального индекса плодородия неиспользуемой в сельском хозяйстве целинной почвы F_{vgn}^j , рассчитанного на начало 21 века по формуле (17), и локальным радиационным индексом сухости Будыко (1977):

$$IHT_{vgn}^j = \frac{Rn^j}{\lambda Pr^j} \quad (18)$$

где Rn^j и Pr^j – среднегодовые значения соответственно радиационного баланса (кДж м⁻²) и осадков (мм); λ – скрытая теплота испарения, равная 2,51 кДж м⁻² мм⁻¹.

Такая связь была установлена в работе Nikol'skii *et al.* (2006) для целинных равнинных территорий Мексики, расположенных в различных климатических зонах и показана на рисунке 1.

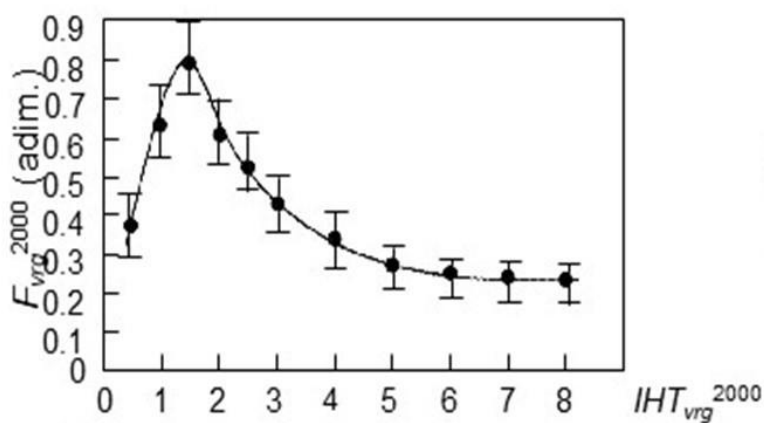


Рис. 1. График зависимости модальных региональных значений интегрального индекса плодородия целинных равнинных почв Мексики F_{vgn}^{2000} от регионального радиационного индекса сухости IHT_{vgn}^{2000} в начале 21 века. Почвы отобраны с уклонами поверхности менее 3% (для исключения или существенного уменьшения влияния поверхностного стока на процесс почвообразования) и глубиной почвенного слоя не менее 1м (для исключения или существенного уменьшения влияния минералогического состава почвообразующей породы). Показаны доверительные интервалы изменения F_{vgn}^{2000} с 95% вероятностью.

Для расчета индекса IHT_a^j для сельскохозяйственных территорий, занятых под сахарным тростником в начале и конце 21 века, среднегодовое значение радиационного баланса Rn_a^j определялось по следующей формуле (Allen *et al.*, 2006):

$$Rn_a^j = (1 - \alpha)Rg_a^j - Rb_a^j \quad (19)$$

где α – альbedo сельскохозяйственной территории; Rg_a^j и Rb_a^j – соответственно, суммарная радиация (приходящая радиация) и уходящая

длинноволновая радиация в год j (мДж м⁻² сут⁻¹). Значения Rg_a^{2000} для сельскохозяйственных земель с сахарным тростником в начале XXI века известны из публикации (ИМТА, 2016). Информация о Rg_a^{2100} получена из публикаций (Cavazos *et al.*, 2013; Fernandez *et al.*, 2018). Значения Rb_a^j были рассчитаны в зависимости от температуры воздуха T с использованием методологии, описанной в работе (Allen *et al.*, 2006).

Для оценки изменения интегрального индекса плодородия сельскохозяйственных почв в конце 21 века по отношению к его началу (F_a^{2100}/F_a^{2000}) в зависимости от сценариев изменения климатического индекса IHT_a^j использован график на рис. 1.

В соответствии с географическим законом зональности почв (Докучаев, 1899; Григорьев, 1954), учитывая относительно медленное изменение климата, график $F_{vrg}^{2000}(IHT_{vrg}^{2000})$, установленный для начала 21 века, должен сохраниться и в конце столетия. Поэтому, если мы знаем, как изменится индекс IHT_a^j целинных и сельскохозяйственных земель в конце века по сравнению с его началом, мы сможем оценить изменение индекса плодородия сельскохозяйственных земель только за счет изменения климата. Для этого необходимо на графике $F_{vrg}^{2000}(IHT_{vrg}^{2000})$ взять значения F_{vrg}^{2000} и F_{vrg}^{2100} , соответствующие радиационному индексу сухости IHT_a^{2000} и IHT_a^{2100} в начале и конце 21 века. Региональное соотношение $F_{vrg}^{2100}/F_{vrg}^{2000}$ можно применить к соотношению для сельскохозяйственных участков с сахарным тростником F_a^{2100}/F_a^{2000} следующим образом:

$$F_a^{2100} = F_a^{2000} (F_{vrg}^{2100}/F_{vrg}^{2000}) \quad (20)$$

где F_a^{2000} и F_a^{2100} – среднегодовые значения интегрального индекса плодородия сельскохозяйственных почв под сахарным тростником в начале и конце 21, соответственно. Значения F_a^{2000} определяются по формуле (17). F_{vrg}^{2000} и F_{vrg}^{2100} – региональные среднегодовые значения интегрального индекса плодородия целинных почв того же региона, полученные из рисунка 1 на основе известных значений климатического индекса IHT_a^{2000} и IHT_a^{2100} .

Затем по формуле (1) рассчитывается урожайность на конец 21 века по каждому из выбранных участков сахарного тростника.

Анализ результатов

На рисунке 2 показаны результаты сравнения урожайности сахарного тростника Y_{calc}^{2000} , рассчитанной по указанной выше модели и полученной Y_{obs}^{2000} на каждой из исследованных территорий в начале 21 века. Данные по реальной урожайности получены по материалам работ (Aguilar-Rivera, 2014; Flores-Granados, 2017; SIAP, 2017). Сравнение сделано по нормированным величинам $Y_{calc}^{2000}/Y_{calc\ max}^{2000}$ и $Y_{obs}^{2000}/Y_{obs\ max}^{2000}$, чтобы по возможности уменьшить случайные ошибки, связанные процессом расчета и учета

урожайности. Значения Y_{calc}^{2000} , $Y_{calc\ max}^{2000}$, Y_{obs}^{2000} и $Y_{obs\ max}^{2000}$ соответствуют товарной сырой массе урожая.

На этом рисунке показаны две линии сравнения. Сплошная линия соответствует случаю полного совпадения расчетной и наблюдаемой урожайности: $Y_{calc}^{2000}/Y_{calc\ max}^{2000} = Y_{obs}^{2000}/Y_{obs\ max}^{2000}$. Пунктирная линия соответствует случаям отклонения от полного совпадения, случаям, описываемым уравнением регрессии $Y_{calc}^{2000}/Y_{calc\ max}^{2000} = a(Y_{obs}^{2000}/Y_{obs\ max}^{2000}) + b$, где a и b — константы. Статистическая обработка данных проведена с помощью программы Curve Expert (Hyams, 2010).

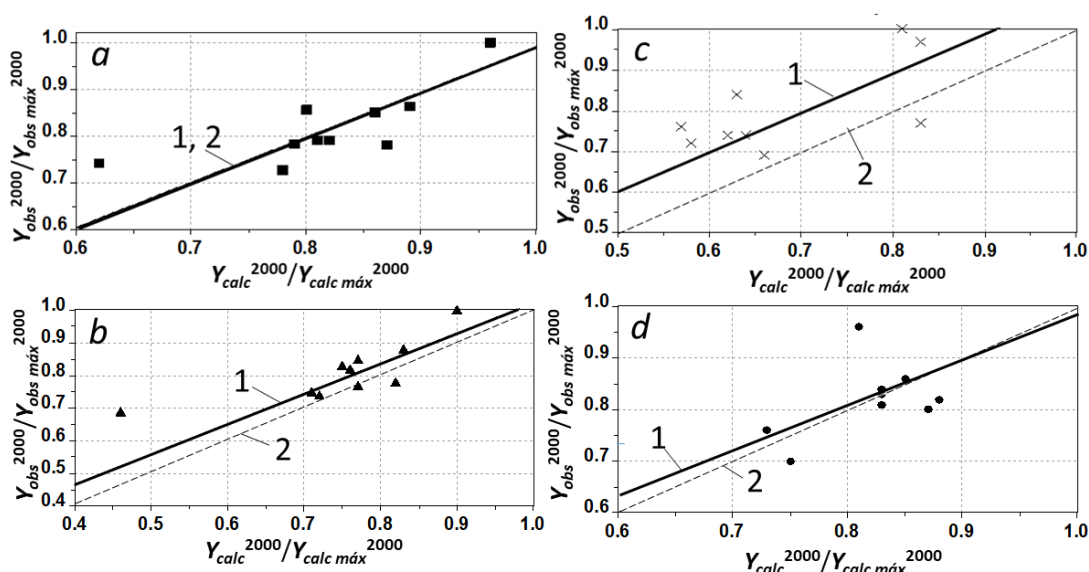


Рис. 2. Графики сравнения нормированных значений расчетной ($Y_{calc}^{2000}/Y_{calc\ max}^{2000}$) и наблюдаемой ($Y_{obs}^{2000}/Y_{obs\ max}^{2000}$) урожайности сахарного тростника на исследованных территориях штата Веракрус Мексики в начале 21 века. 1 – линия полного совпадения расчетной и наблюдаемой урожайности; 2 – линия отклонения от полного совпадения; a – территория Коатотолалан; b – Сан Кристоаль; c – Сан Педро; d – Трес Вайес

Уравнения регрессии этих связей имеют следующий вид:

Для территории Коатотолалан:

$$\frac{Y_{obs}^{2000}}{Y_{obs\ max}^{2000}} = 0.95 \frac{Y_{calc}^{2000}}{Y_{calc\ max}^{2000}} + 0.04 \quad (18)$$

с коэффициентом детерминации $R^2 = 0.98$ и стандартной ошибкой $\sigma = 0.06$.

$Y_{obs\ max}^{2000} = 54.13$ т/га; $Y_{calc\ max}^{2000} = 56.2$ т/га.

Для территории Сан Кристоаль:

$$\frac{Y_{obs}^{2000}}{Y_{obs\ max}^{2000}} = 0.93 \frac{Y_{calc}^{2000}}{Y_{calc\ max}^{2000}} + 0.1 \quad (19)$$

$R^2 = 0.95$, $\sigma = 0.08$. $Y_{obs\ max}^{2000} = 56.26$ т/га; $Y_{calc\ max}^{2000} = 58.7$ т/га.

Для территории Сан Педро:

$$\frac{Y_{obs}^{2000}}{Y_{obs\ max}^{2000}} = 0.95 \frac{Y_{calc}^{2000}}{Y_{calc\ max}^{2000}} + 0.12 \quad (20)$$

$R^2 = 0.93$, $\sigma = 0.10$. $Y_{obs\ max}^{2000} = 66.46$ т/га; $Y_{calc\ max}^{2000} = 67.11$ т/га.

Для территории Трес Вайес:

$$\frac{Y_{obs}^{2000}}{Y_{obs\ max}^{2000}} = 0.85 \frac{Y_{calc}^{2000}}{Y_{calc\ max}^{2000}} + 0.13 \quad (21)$$

$R^2 = 0.98$, $\sigma = 0.06$. $Y_{obs\ max}^{2000} = 58.40$ т/га; $Y_{calc\ max}^{2000} = 60.75$ т/га.

Линейная зависимость между рассчитанной и реальной урожайностью, полученная с помощью подобранных уравнений, статистически значима при уровне доверия 95%. Наилучшее соответствие было получено для территории Куатололапан и относительно худшее для Сан Педро. На всех территориях коэффициент детерминации между относительными значениями $Y_{calc}^{2000}/Y_{calc\ max}^{2000}$ и $Y_{obs}^{2000}/Y_{obs\ max}^{2000}$ больше 0.9.

Отсюда можно сделать вывод, что, в целом, модель (1) позволяет рассчитать урожайность сахарного тростника с хорошим совпадением с реальной урожайностью на всех исследованных территориях.

В таблице 2 представлены результаты оценки влияния изменения климата в конце 21 века на продуктивность сахарного тростника в штате Веракрус. В этой таблице оценены ожидаемые изменения относительной продуктивности производительности $\delta Y_{calc} = Y_{calc}^{2100}/Y_{calc}^{2000}$ и ее компонентов δY_{pot} , δK_{hidr} и δF_a .

Таблица 2. Ожидаемое изменение урожайности сахарного тростника δY_{calc} и его компонентов δY_{pot} , δK_{hidr} и δF_a на четырех исследованных территориях штата Веракрус Мексики в конце 21 века (2075-2099 гг.) при изменении климата согласно моделям циркуляции атмосферы GFDL CM3, HADGEM2 и MPI ESM LR для двух сценариев роста концентрации CO₂ в атмосфере (RCP): 4.5 (650 ppm CO₂) и 8.5 (1370 ppm CO₂)

Территория	Модель циркуляции атмосферы	RCP 4.5				RCP 8.5			
		δY_{pot}	δK_{hidr}	δF_a	δY_{calc}	δY_{pot}	δK_{hidr}	δF_a	δY_{calc}
Коатотолопан	GFDL CM3	0.88	0.91	1.08	0.85	0.90	0.96	0.98	0.82
	HADGEM2	1.02	0.84	1.02	0.85	0.82	0.99	1.01	0.80
	MPI ESM LR	1.00	0.93	0.96	0.86	0.95	0.93	0.96	0.82
Сан Кристоаль	GFDL CM3	0.94	0.87	1.09	0.89	0.95	0.87	1.07	0.86
	HADGEM2	1.04	0.84	1.03	0.89	0.89	0.85	1.12	0.84
	MPI ESM LR	0.98	0.91	1.00	0.91	0.90	0.92	1.07	0.87
Сан Педро	GFDL CM3	1.03	0.80	1.09	0.90	1.07	0.82	1.02	0.89
	HADGEM2	1.06	0.78	1.10	0.91	1.04	0.81	1.03	0.87
	MPI ESM LR	1.13	0.80	1.02	0.92	1.04	0.82	1.03	0.88
Трес Вайес	GFDL CM3	1.01	0.96	1.04	1.01	0.93	0.98	1.08	0.99
	HADGEM2	1.05	0.89	1.08	1.01	1.11	0.86	1.04	0.99
	MPI ESM LR	0.97	0.96	1.08	1.01	1.06	0.90	1.04	1.00

Анализируя данные таблицы 2, можно сделать вывод, что три модели атмосферной циркуляции (GFDL CM3, HADGEM2 и MPI ESM LR),

рекомендованные Cavazos et al. (2013) показывают в целом аналогичное изменение урожайности сахарного тростника (δY_{calc}), несмотря на то, что между его компонентами (δY_{pot} , δK_{hidr} и δF_a) существует небольшая разница. Оценка влияния изменения климата на продуктивность сахарного тростника показывает, что в случае удвоения концентрации CO_2 в атмосфере в конце 21 века, урожайность его по сравнению с нынешним будет ниже на 8 – 15% на основных территориях – производителях сахарного тростника в штате Веракрус. При четырехкратном росте концентрации CO_2 урожайность снизится на 11–20% (за исключением, возможно, территории Трес Вайес, где ожидается сохранение текущей продуктивности).

Ожидаемое повышение температуры воздуха, фотосинтетически активной радиации и концентрации CO_2 в атмосфере вызовет изменение потенциальной продуктивности (δY_{pot}) от снижения на 12% до увеличения на 13%, в зависимости от изобретательности. Накопление CO_2 в атмосфере.

Но большинство значений $\delta Y_{pot} = \frac{\delta Y_{pot}^{2100}}{\delta Y_{pot}^{2000}}$ находятся в диапазоне от 0.95 до 1.05, а это означает, что в целом в обоих сценариях роста CO_2 потенциальная продуктивность практически не изменится.

Установлено, что основным фактором снижения продуктивности сахарного тростника является уменьшение водного индекса K_{hidr}^j от 4 до 22% в результате, главным образом, уменьшения количества осадков в относительно засушливый период (с ноября по май). Влияние повышения температуры воздуха и солнечной радиации на увеличение эвапотранспирации и уменьшение индекса K_{hidr}^j незначительно.

Что касается изменения плодородия почв вследствие изменения климата, то ожидается, что интегральный индекс плодородия F_a практически не изменится при обоих сценариях роста концентрации CO_2 в атмосфере. Типичное изменение значения $\delta F_a = F_a^{2100} / F_a^{2000}$ на изучаемых территориях находится в пределах от 1.00 до 1.05, за исключением территории Сан-Кристобаль, где ожидается изменение δF_a в несколько более широком диапазоне - от 0.96 до 1.09 при удвоении концентрации CO_2 и от 1.07 до 1.12 при четырехкратном росте концентрации CO_2 .

Характер ожидаемого изменения урожайности сахарного тростника в конце 21 века в целом согласуется с данными, опубликованными Bravo-Mosqueda et al. (2012), Марин и др. (2013) и Сифонтес (2016). Однако эти авторы, используя подходы, отличные от нынешнего, пришли к выводу, что ожидаемое снижение урожайности сахарного тростника связано в основном с повышением температуры по сравнению с незначительной ролью осадков. Они объясняют это тем, что повышение температуры может вызвать сокращение продолжительности цикла сбора урожая и снизить концентрацию сахарозы. Наше исследование показывает, что основным фактором снижения продуктивности сахарного тростника является

уменьшение количества осадков в относительно засушливый период (с ноября по май). Этот вывод позволяет сделать рекомендацию, что во избежание потерь урожая в будущем следует усовершенствовать технологию управления водным режимом почв за счет сокращения возможного стока поверхностных вод в периоды выпадения осадков в относительно засушливый период влажной тропической зоны. Следует отметить, что заключение об ожидаемом изменении урожайности сахарного тростника под влиянием изменяющегося климата относится к случаю сохранения сортов растений и технологии управления культурой, почвой и водными ресурсами в будущем. В действительности же, в будущем по-видимому можно ожидать улучшения сортов сахарного тростника и технологии его возделывания.

Выводы

- Оценка влияния изменения климата на продуктивность сахарного тростника на четырех исследованных территориях штата Веракрус Мексики (где производится основная масса этой культуры), выполненная на основе физиологической модели ИСА/ФАО, указывает на то, что в конце 21 века существует риск потери производства сахарного тростника до 22%, в основном из-за уменьшения количества осадков.

- Расчеты урожайности на начало 21 века показывают хорошее соответствие результатов с наблюдаемой урожайностью. Коэффициент корреляции между расчетной и фактически наблюдаемой доходностью равен 0,93-0,98 при стандартной ошибке 0,06-0,10. Это означает, что физиологическая модель ИСА/ФАО, основанная на агроэкологических принципах и ограниченном количестве климатических и почвенных переменных, может использоваться в качестве инструмента для оценки воздействия изменения климата на продуктивность сахарного тростника.

Литература

Будыко М.И. (1977). Глобальная экология. Изд. Наука, Москва.

Григорьев А.А. (1954). Географическая зональность и некоторые ее закономерности. // Изв. АН СССР, сер. географ. №5., с.5...17.

Докучаев В.В. (1899). К учению о зонах природы: горизонтальные и вертикальные почвенные зоны. СПб.: Типография СПб. градоначальства, 28 с.

Пегов С.А., Хомяков П.М. (1991). Моделирование развития экологических систем. Гидрометеиздат, Ленинград, 223 с.

Aguilar-Rivera N. (2014). Reconversión de la cadena agroindustrial de la caña de azúcar en Veracruz, México. *Revista Electrónica Nova Scientia*, vol.6 (2), # 12: 125-161.

- Allen G. R., Santos L., Raes D., Smith M. (2006). Evapotranspiración del cultivo. *Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Publ. FAO 56, Rome, Italy, 298 pp.
- Arnold, R.W., I. Szabolcs, V.O. Targulian (Eds.). (1990). *Global Soil Change*. Ed. IIASA, Laxenburg, Austria.
- Bravo-Mosqueda E., Medina-García G., Ruíz-Corral J.A., Báez-González A.D. y Mariles-Flores V. (2012). *Cambio climático y su impacto potencial en el sistema producto caña de azúcar en el área de abasto del ingenio Adolfo López Mateos*. Publ. INIFAP #11, 52 pp.
- Castillo M., Nikolskii I., Ortiz C., Vaquera A., Cruz G., Mejía E., González A. (2007). Alteración de la fertilidad del suelo por el cambio climático y su efecto en la productividad agrícola. *Interciencia*, v. 32 # 6, 368-376.
- Cavazos T., Salinas J. A., Martínez B., Colorado G., De Grau P., Prieto-González R., Conde-Álvarez A. C., Quintanar-Isaías A., Santana-Sepúlveda J.S., Romero-Centeno R., Maya-Magaña M.E., Rosario de la Cruz J.G., Ayala-Enríquez Ma.R., Carrillo-Tlazazanatza H., Santiesteban O. y Bravo M.E. (2013). *Actualización de escenarios de cambio climático para México como parte de los productos de la quinta comunicación nacional*. Informe Final del Proyecto al INECC, México, DF, Publ. INECC, 150 pp.
- CEPAL-FAO. (2013). *Agricultura y cambio climático. Economía y modelación*. Memoria de cuatro Seminario Regional de Agricultura y Cambio Climático, Publ. ONU, pp. 13-28. Recuperado de https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/37911/S1500014_es.pdf
- Donatelli M., Magarey R.D., Bregaglio S., Willoquet L., Whish J.P.M., and Savary S. (2017). Modelling the impacts of pests and diseases on agricultural systems. *Agricultural systems*, 155, 213-224, doi: 10.1016/j.agsy.2017.01.019
- Driessen P.M., Konijn N.T. (1992). *Land-use systems analysis*. Publ. Wageningen Agricultural University, 6701 AR Wageningen, The Netherlands.
- Duli Z., Yang-Rui L. (2015). Climate change and sugarcane production: potential impact and mitigation strategies. *International Journal of Agronomy*, v. 12, 1-11.
- FAO (2006). *World reference base for soil resources 2006*. 2nd edition. World Soil Resources Reports No. 103, FAO Publ., Rome, Italy.
- FAO. (2012). *Crop response to water*. FAO Publ., Irrigation and Drainage Paper, No. 66, 501 pp.
- FAO. (2018). *AguaCrop. Crop water productivity model, ver. 6.1*. Computer Program. FAO Publ., Rome, Italy.
- Fernandez M.E. (2013). *Efectos del cambio climático en la producción y rendimiento en cultivos por sectores*. FONADE-IDEAM Publ., Bogotá, Colombia, 50 pp.

- Fernandez A., Zavala J., Romero R. (2018). *Atlas Climático Digital de México*. Publ. Centro de Ciencias de Atmósfera de la UNAM. Recuperado de <http://uniatmos.atmosfera.unam.mx/>
- Flores-Granados J. (2017). Productividad y rentabilidad de la caña de azúcar en Veracruz. *El Economista*, 22/03/2017. Recuperado de <https://www.eleconomista.com.mx/>
- Guerra A., Hernández A. (2014). El cambio climático y el cultivo de la caña de azúcar. En: *El cultivo de la caña de azúcar en Guatemala* (eds. Melgar M., Meneses A., Orozco H., Pérez O., Espinosa R.). Litografías Modernas S.A., Guatemala, 479-512.
- Hyams D. A. (2010). *Comprehensive curve fitting system for windows (computer programme)*. Version 1.4. Publ. Microsoft Corp., San Francisco, USA.
- IIASA/FAO. (2012). *Global Agro-Ecological Zones (GAEZ v3.0)*. IIASA-FAO Publ., Rome, Italy.
- IMTA. (2016). *Extractor rápido de información climatológica de México ERIC IV. versión 4.1.*, Jiutepec, México: CNA-IMTA.
- INEGI. (1988). *Conjunto de las cartas de topografía, geología, uso de suelo y edafología*, (escala 1:250000 y 1:50000) de la República Mexicana. Publ. INEGI, Aguascalientes, México.
- INEGI (2004). *Información Nacional sobre Perfiles de Suelo. Ver. 1.2*. Publ. INEGI, Aguascalientes, México.
- Linnenluecke M.K., Nucifora N., Thomson N. (2018). Implications of climate change for the sugarcane industry. *Climate Change*, v. 9, 1-34.
- Marin F.R., Jones J.W., Singels A., Royce F., Assad E.D., Pellegrino G.Q., Justino F. (2013). Climate change impacts on sugarcane attainable yield in southern Brazil. *Climate Change*, v. 117,
- Nikolskii Yu.N., Castillo-Álvarez M., Bakhlaeva, O.S., Román-Callero, X.A., Maslov, B.S. (2006). The influence of the possible global climate change on the properties of Mexican soils. *Eurasian Soil Science*, v. 39, # 11, 1164-1169.
- OIA. (2013). Organización Internacional del Azúcar. *Cambio climático y cultivos azucareros. MECAS (13)07*. Publ. Canary Wharf, London, 52 pp.
- SIAP. (2017). *Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Atlas Agroalimentario*, Publ. SAGARPA.
- SIAP-COLPOS. (2009). *Diagnóstico, modelaje y recomendaciones de la fertilidad de suelos del campo cañero*. Publ. SIAP-COLPOS.
- Sifontes L.J. (2016). *Cambio climático en la producción de caña de azúcar*. SOFOS, México. Recuperado de <http://www.sofoscorp.com/cambio-climatico-en-la-produccion-de-cana-de-azucar/>
- Srivastava A.K., Mahendra K.R. (2012). Sugarcane production: impact of climate change and its mitigation. *Biodiversitas*, v. 13, # 4, 214-227.
- Terrazas-Mendoza L., Nikolskii-Gavrilov I., Herrera-Gómez S.S., Castillo-Álvarez M., Exebio-García A.A. (2010). Alteración de la fertilidad del

suelo, y vulnerabilidad de maíz y trigo bajo riego debido al cambio climático. *Tecnología y Ciencias del Agua*, v. 1 # 1, 87-102.