

**Sección:** Concientífica

# *La Citogenética y sus aportaciones en el desarrollo de las ciencias*

*Cytogenetics and its contributions to the development of science*

Viridiana García-Rodríguez<sup>1</sup>

Dalia Molina-Romero<sup>2</sup>

Verónica Cepeda-Cornejo<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>*Biotecnología Molecular y de Cultivos, Facultad de Ciencias Biológicas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 72570, Puebla, México.*

<sup>2</sup>*Laboratorio de Interacciones Bioquímicas y Moleculares Aplicadas, Facultad de Ciencias Biológicas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 72570, Puebla, México.*

\*Autor para la correspondencia: [veronica.cepeda@correo.buap.mx](mailto:veronica.cepeda@correo.buap.mx)

## **RESUMEN**

La citogenética es una rama de la genética que estudia a los cromosomas en base a su estructura, función, comportamiento y las alteraciones que estos puedan presentar. La citogenética clásica estudia la morfología y el número de cromosomas y la citogenética molecular se encarga de la localización de las zonas específicas donde se ubican los genes. La citogenética proporciona información útil para programas de mejoramiento genético en plantas y para la comprensión de enfermedades causadas por alteraciones (aberraciones) cromosómicas. Los avances en citogenética resultan fundamentales en la búsqueda de plantas resistentes a sequías ante un escenario de cambio climático global.

*Palabras clave: Citogenética vegetal, hibridación fluorescente in situ, cromosomas.*

## **SUMMARY**

Cytogenetics is a branch of genetics that studies chromosomes based on their structure, function, behavior, and any abnormalities they may exhibit. Classical cytogenetics studies chromosome morphology and number, while molecular cytogenetics focuses on locating the specific regions where genes are situated. Cytogenetics provides useful information for plant breeding programs and for understanding diseases caused by chromosomal abnormalities (aberrations). Advances in cytogenetics are essential in the search for drought-resistant plants in the context of global climate change.

*Keywords: Plant cytogenetics, in situ fluorescent hybridization, chromosomes.*

## Función e importancia de los cromosomas

Alguna vez te has preguntado: ¿qué es lo que nos hace tener el pelo oscuro o claro?, ¿ser más altos o bajos?, ¿estar más delgados o robustos? La información que nos hace ser como somos está contenida en un fragmento de ADN conocido como gen. Los genes están contenidos en los cromosomas y se encuentran dentro de cada una de nuestras células. Los cromosomas se definen como un paquete ordenado de ácido desoxirribonucleico (ADN) que está unido a proteínas llamadas histonas y le dan una estructura; se encuentran dentro de las células y son esenciales en todos los organismos; debido a que son los encargados de portar la información genética, tanto en células eucariotas como en células procariontes. Las células eucariotas se caracterizan por tener un núcleo rodeado por una membrana en donde se almacena el ADN; a diferencia de las células procariontes que su material genético es una molécula de ADN circular y no está protegido por una membrana. Es así como el ADN es el material que se hereda de una célula madre a una célula hija; este material genético debe conservarse de forma íntegra después de que ocurre la división celular y durante toda la vida del organismo [1, 2].

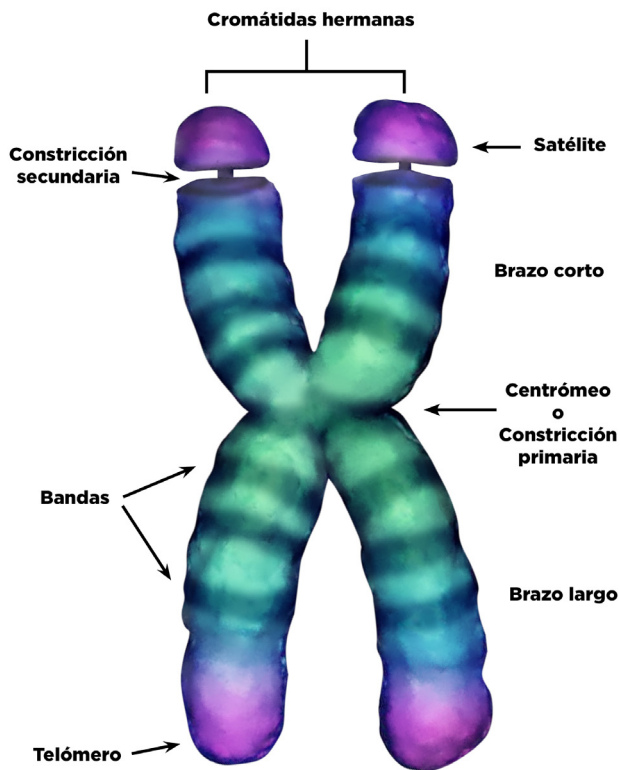
Los cromosomas contienen el material genético de las células, su nombre proviene del griego cromos: color y soma: cuerpo. La estructura del cromosoma comprende tres regiones: el brazo corto (p), el centrómero (parte constreñida) y el brazo largo (q) y constricciones que cuando se localizan en el brazo corto reciben el nombre de satélites y cuando están en el brazo largo reciben el nombre de constricciones secundarias (Figura 1). La posición del centrómero establece la clasificación de los cromosomas, que comprende a los tipos: metacéntricos, submetacéntricos, subtlocéntricos y telocéntricos [2].

La morfología del cromosoma se modifica

en cada etapa del ciclo celular. Este ciclo está integrado por las fases: G1, S, G2 y M. En la fase M se separan los cromosomas y migran activamente hacia los polos opuestos de la célula. En las células somáticas, que son aquellas que conforman a todo el organismo, su fase M es la mitosis. A diferencia de las células reproductivas (ovulo y espermatozoide en células animales) que su ciclo celular contiene primero a una mitosis y después a la meiosis [1]. Durante la mitosis se duplica el material genético y se separan dos conjuntos de cromosomas (2n), mientras en la meiosis se separa un conjunto completo de cromosomas (n). La mitosis está conformada por cuatro etapas: profase, metafase, anafase y telofase. Es durante la metafase que los cromosomas se encuentran en su mayor grado de contracción y es posible observar con detalle la morfología de los cromosomas y elaborar su cariotipo (Figura 1).

## Importancia del cariotipo

El cariotipo es el conjunto completo de los cromosomas de un individuo ordenado por su número, forma y estructura [1]. El cariotipo es específico para cada especie; los detalles morfológicos le confieren un valor distintivo, comparable a una huella digital [1] y esto tiene relevancia en la caracterización taxonómica de las especies y en programas de mejoramiento genético. La observación de un gran número de células vegetales, animales o microorganismos nos permite percibir las grandes diferencias en la diversidad de cariotipos que existen entre las especies, lo que nos conduce a preguntarnos: ¿por qué resulta interesante conocer el cariotipo? La citogenética no solo se enfoca en el conocimiento de la morfología de los cromosomas de todas las células, va más allá de conocer la ubicación del centrómero, la longitud de los brazos, el número de satélites o constricciones secundarias presentes en la especie. La citogenética proporciona información valiosa para campos como la sistemática,



**Figura 1.** Estructura del cromosoma comprende región central (centrómero), brazo corto, brazo largo, satélite (situado en brazo corto) y constricción secundaria (situada en brazo largo) (Ilustración elaborada por Carmen Gutiérrez Cornejo, 2026).

la evolución y la toxicología [1, 2].

Las técnicas de citogenética clásica comprenden el uso de colorantes con tonos rojizos (orceína) y rosados (fucsina básica) que permiten observar la estructura del cromosoma a detalle con ayuda del microscopio óptico (Figura 2). Una herramienta más poderosa para la observación de los detalles finos de los cromosomas es la microscopía de fluorescencia que nos permite observar a detalle las regiones organizadoras del nucléolo (NOR) que están localizadas tanto en el brazo largo como en el brazo corto de los cromosomas. Son regiones muy conservadas y se emplean como un método de identificación de las especies [1, 2].

Los tejidos de las plantas que se utilizan para la visualización de los cromosomas mitóticos son las regiones en crecimiento constan-

te ubicadas en los extremos de las hojas y de la raíz, mientras que para observar meiosis se emplean gránulos de polen y óvulos de flores en desarrollo [1, 3].

## Introducción a la Citogenética Vegetal

La citogenética deriva de la combinación de dos disciplinas biológicas: la citología, que estudia la estructura, función y organización de las células y la genética, que es la ciencia dedicada al estudio de: 1) la transmisión de caracteres (herencia de la información genética de padres a hijos), 2) genética de poblaciones (suma de la información genética de los individuos que componen una población) y 3) la genética molecular que estudia la estructura, función, expresión y regulación de los genes a nivel molecular (ADN y ARN); además de la regulación de la expresión de los genes que determinan las características que vemos del organismo (fenotipo). El fenotipo de un organismo depende de la información propia de los genes y de forma importante también influye el ambiente [4].

Combinando la citología y la genética surge la citogenética, esta última se enfoca en el número, morfología cromosómica, estructura y función, tanto de células somáticas como de células gaméticas o reproductivas (polen y óvulos en las plantas). La recombinación ocurre durante la meiosis y consiste en el intercambio de material genético entre los cromosomas homólogos (cromosomas con la misma información genética, uno aportado por el padre y otro aportado por la madre durante el proceso de reproducción) [1].

En particular, toda la información citogenética publicada es de gran relevancia para la industria agrícola, que día a día requiere cubrir la demanda de alimentos. Los agrónomos se enfrentan al reto de generar variedades más eficientes a la sequía, crecimiento acele-

rado de las plantas, aumento de la producción, maduración temprana del grano y una mejor adaptación a distintos ambientes [4].

Al estudiar los cromosomas de los organismos y evaluar la variedad del material genético que existe en una población, podemos diseñar estrategias para preservar la diversidad genética y proteger a las especies amenazadas [3]. Por lo que la citogenética contribuye a la conservación de especies que se encuentran en peligro de extinción, ya sea en su entorno natural o en condiciones de cultivo.

## Historia y Evolución de la Citogenética en Plantas

El inicio de la citogenética se remonta al descubrimiento del número cromosómico de diferentes especies vegetales, así como el estudio de su estructura. Una de las pioneras fue Barbara McClintock con su trabajo sobre el maíz (*Zea mays*), que identificó a los “genes saltarines” o “transposones”, estudios que facilitaron la comprensión de la estructura del genoma de las plantas. La utilización de tinciones de los cromosomas permitió generar mapas citogenéticos en otras especies, como arroz (*Oryza sativa*), tomate (*Solanum lycopersicum*) y sorgo (*Sorghum bicolor*); aunque las primeras técnicas tenían ciertas limitaciones para las especies cuyos cromosomas mantienen tamaños similares [1, 3, 5].

Conforme fueron avanzando los descubrimientos, las técnicas citogenéticas fueron más novedosas, utilizando tinciones fluorescentes, conocidas como técnicas *in situ*, también se mejoró la visualización de los cromosomas en la fase de mitosis de células somáticas [3].

## Técnicas de Citogenética Clásica y Molecular en plantas

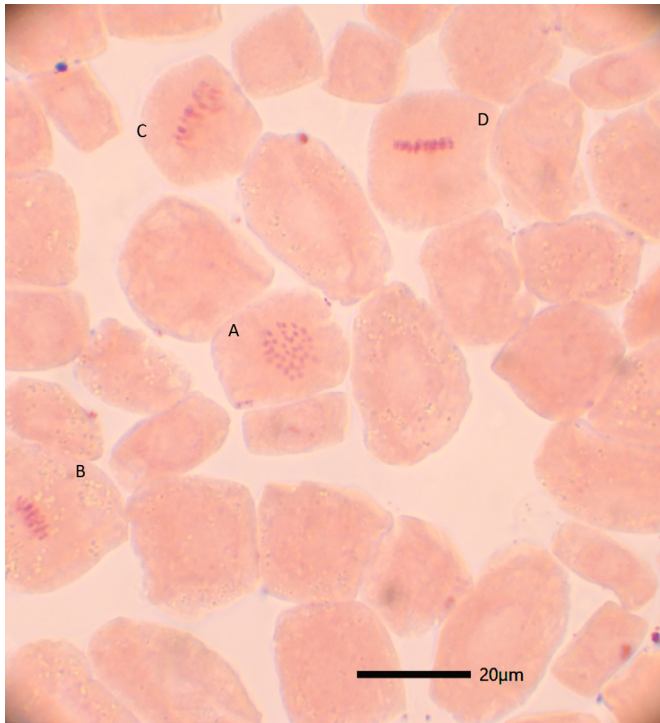
Como ya se mencionó previamente, la ci-

togenética clásica se enfoca en estudiar el número y la morfología de los cromosomas, mediante tinciones básicas que emplean diversos colorantes para su observación al microscopio (Figura 2). Algunos colorantes tiñen por completo el cromosoma (orceína y fucsina básica) y otros como la Giemsa, solo tiñen algunas regiones generando bandas que permiten identificar alteraciones cromosómicas.

La citogenética molecular detecta la ubicación precisa de los genes sobre el cromosoma (Figuras 3 y 4) y emplea métodos como la hibridación fluorescente *in situ* (FISH, por sus siglas en inglés Fluorescence in situ Hybridization) y la Hibridación genómica *in situ* (GISH, por sus siglas en inglés Genomic in situ hybridization). La técnica FISH es usada para detectar anomalías cromosómicas y es de gran ayuda en el diagnóstico de enfermedades (Figura 5) [1, 3, 5]. La técnica de GISH resulta de una modificación de la técnica de FISH y permite identificar la procedencia del genoma en plantas híbridas, ya sea la determinación de cultivares de híbridos intergenéricos (organismos que resulta del cruzamiento entre plantas de géneros distintos) e interespecíficos (organismos resultantes del cruzamiento entre plantas de especies distintas pertenecientes al mismo género) [1, 3, 5]. Inclusive es posible analizar a los cromosomas en la fase mitótica, para identificar al organismo incluso cuando no se tiene información sobre la morfología cromosómica de una especie [5]. Las técnicas de FISH y GISH ocupan compuestos fluorescentes, por ejemplo: fluoresceína y rodamina, que brillan cuando son expuestos a lámparas especiales como las de mercurio.

## Tendencias actuales en el campo de la citogenética

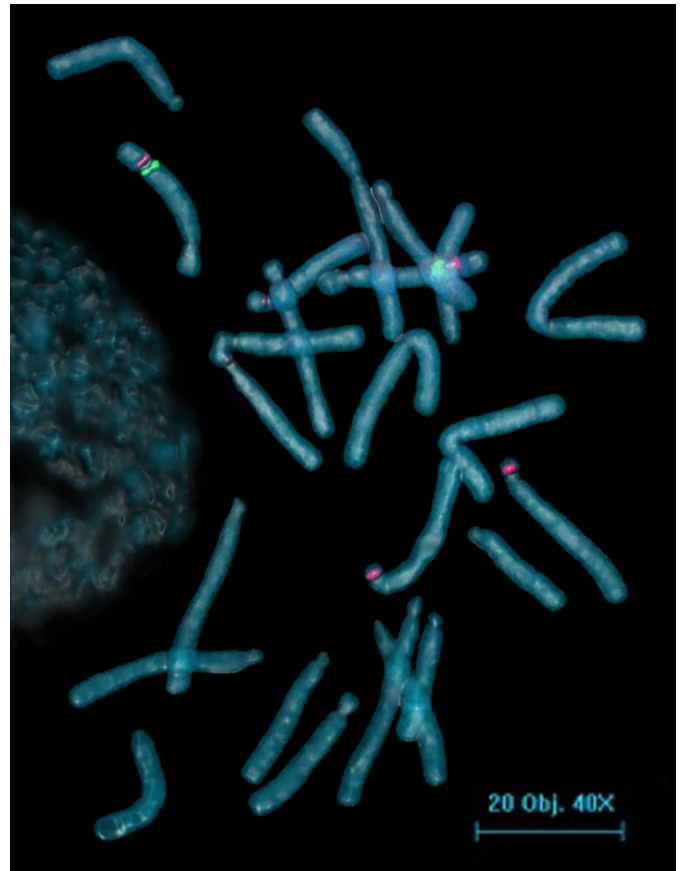
Uno de los aportes más significativos del estudio citogenético es la comprensión de la morfología y número de cromosomas. Esta



**Figura 2.** Se observa un campo al microscopio óptico de los cromosomas de *Amaranthus* sp. La muestra se obtuvo de meristemos de raíz y se tiñó con la técnica de acetoorceína. Se pueden observar distintas etapas de la mitosis. Al centro, A) cromosomas definidos y en metafase temprana, los cromosomas se encuentran en el máximo nivel de contracción y separados. En la periferia, hay tres células en proceso de división celular, B) y D) las células se encuentran en metafase tardía, los cromosomas se alinean en la parte media de la célula para la separación de las cromátidas hermanas y C) anafase, los cromosomas duplicados se separan y migran activamente hacia los polos opuestos de la célula (Imagen obtenida por Viridiana García Rodríguez, 2024).

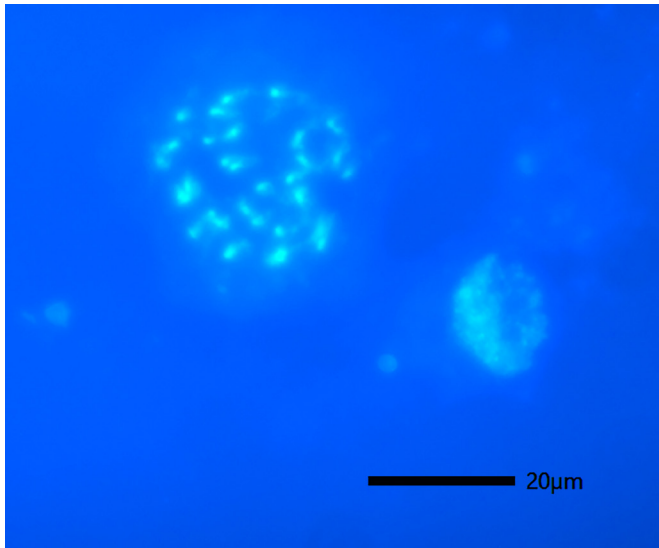
información resulta relevante para establecer las relaciones evolutivas entre las especies [2]. Otra aplicación de la citogenética es en medicina para la detección de anomalías cromosómicas y mejoramiento genético para la selección de variedades de plantas de uso agrícola que resistan las condiciones estresantes; por ejemplo, sequía, salinidad, deficiencia de nutrientes, contaminación, altas temperaturas ocasionadas por cambio climático, niveles inadecuados de radiación y presencia de plagas [5].

Actualmente los estudios en citogenética se han enfocado en los efectos de la contaminación. Los metales pesados son conta-



**Figura 3.** Visualización al microscopio óptico de cromosomas de *Lilium* sp. con aplicación de la técnica de FISH (Hibridación fluorescente in situ). Se observan las regiones organizadoras del nucléolo (NOR) en dos pares de cromosomas homólogos (4 en total); el marcaje con fluorocromos en rojo y verde (Imagen obtenida por Verónica Cepeda Cornejo y modificada por Carmen Gutiérrez Cornejo, 2026).

minantes que se encuentran dispersos en el aire, el suelo y el agua. Dichos contaminantes presentes en el ambiente son producidos por la actividad antropogénica, por la combustión de los motores, la actividad minera, la construcción de sistemas viales, entre otros. Los metales pesados se acumulan en las plantas y animales afectando su desarrollo y causando alteraciones en el material genético, lo que afecta la estructura de los cromosomas produciendo un cambio en la información del ADN, estos cambios se conocen como mutaciones. Los efectos nocivos del agua contaminada se han estudiado en la cebolla (*Allium cepa*) y en el maíz (*Zea mays*) encontrando aberraciones (alteraciones) cromosómicas reflejadas en una

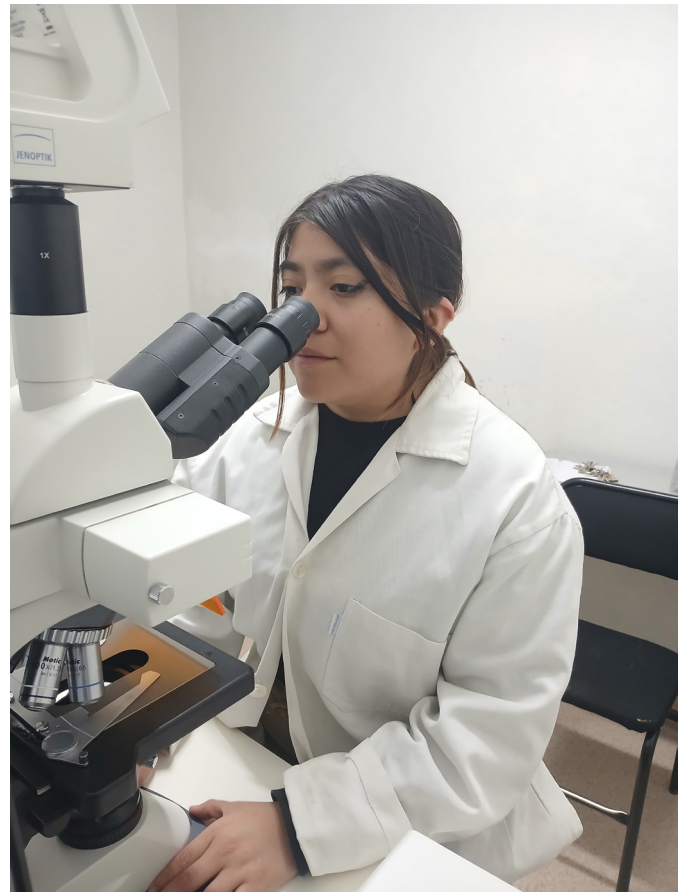


**Figura 4.** Cromosomas de *Amaranthus* sp. en etapa de metafase, vistos al microscopio de fluorescencia con tinción DAPI (Imagen obtenida por Viridiana García Rodríguez, 2025).

disminución del índice mitótico [6].

## Estudios relevantes en agricultura

La información que se obtiene a partir de la citogenética vegetal es empleada por los ingenieros agrónomos y los agricultores con fines de mejoramiento genético en particular para las especies domesticadas o de importancia económica [7]. Entre las especies vegetales cultivadas y de mayor consumo en México destacan el maíz, frijol, jitomate, calabaza, chile, cacao, café, papa y más recientemente el amaranto por su alto valor nutricional [6]. Los estudios en citogenética vegetal se enfocan en los cultivos importantes para nuestra alimentación (Figura 4). El maíz se encuentra entre los más estudiados, así lo señala uno de los estudios más recientes publicado por Shaker y Dar [8], en el que comparan el cariotipo de diez cultivares de *Zea mays* procedentes del Himalaya, encontrando diferencias en el cariotipo y alteraciones cromosómicas entre ellos. Sabemos que el maíz es originario de México, sin embargo, ha sido llevado con éxito a distintas regiones del mundo.



**Figura 5.** Observación y toma de fotografías de laminillas con cromosomas (Fotografía tomada por Gamaliel Peralta Fernández, 2024).

## Perspectivas Futuras de la Citogenética Vegetal

Actualmente, la citogenética constituye una herramienta valiosa que se ha mejorado con los avances de la Biología Molecular (Figuras 4 y 5) [5] y el aporte de las ciencias genómicas [7]. Los avances de la citogenética molecular se podrían aplicar en la identificación de genes que permitan a las plantas resistir la sequía, tolerar altas o bajas temperaturas y el estrés salino [4]. La detección de genes que provocan enfermedades busca implementar estrategias para contrarrestar la incidencia de ciertas enfermedades de las plantas [7]. Al incorporar genes de resistencia a estrés abiótico, la planta logrará adaptarse a los cambios ambientales actuales debidos al “cambio climático”.

Estos avances en la citogenética vegetal también ayudarán a entender cómo las plantas han modificado su información genética para adaptarse a los diferentes ambientes, en otras palabras, demostrar cómo han evolucionado [4]. Además, con esta herramienta se podrán identificar cambios nocivos en el material genético (aberraciones cromosómicas) que propician efectos negativos en las plantas como la disminución de la fertilidad, baja en el porcentaje de la germinación e inhibición del crecimiento de la raíz. Por ejemplo, en las plantas del maíz y de la cebolla, se generan alteraciones cromosómicas debido al contacto de las plantas con las aguas residuales que contienen metales pesados [6].

Es importante mencionar que la citogenética nos ayuda a generar conocimiento sobre la conservación de plantas propias de una región (endémicas) o en peligro de extinción. Por todo lo anterior, la citogenética vegetal es una ciencia que nos permite generar nuevo conocimiento, así como aplicar este saber para mejorar y proteger a las plantas, además de conseguir la seguridad alimentaria a largo plazo (Figura 3) [7].

## Referencias

- [1] Hiremath, S. C., & Chinnappa, C. C. (2015). Plant chromosome preparations and staining for light microscopic studies. In *Plant Microtechniques and Protocols* (pp. 263–286). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-19944-3\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-319-19944-3_16)
- [2] Vimala, Y., Lavania, S., & Lavania, U. C. (2021, April 1). Chromosome change and karyotype differentiation—implications in speciation and plant systematics. *Nucleus* (India). Springer. <https://doi.org/10.1007/s13237-020-00343-y>
- [3] Hwang, Y. J., Cabahug, R. A., Mancía, F. H., & Lim, K. B. (2020, February 1). Molecular cytogenetics and its application to major flowering ornamental crops. *Horticulture Environment and Biotechnology*. *Korean Society for Horticultural Science*. <https://doi.org/10.1007/s13580-019-00198-6>

*ciety for Horticultural Science*. <https://doi.org/10.1007/s13580-019-00198-6>

- [4] Sharma, S.K., Mukai, Y. (2015) Chromosome research in orchids: current status and future prospects with special emphasis from molecular and epigenetic perspective. *Nucleus*. <https://doi.org/10.1007/s13237-015-0152-1>
- [5] Younis, A., Ramzan, F., Hwang, Y. J., & Lim, K. B. (2015). FISH and GISH: molecular cytogenetic tools and their applications in ornamental plants. *Plant Cell Reports*. Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/s00299-015-1828-3>
- [6] Sarkar, A. K, Saha, R, Halder, R. (2022) Chromosomes damage by sewage water studies in the *Allium cepa* L. and *Zea mays* L. *International Journal of Cytology, Cytosystematics and Cytogenetics*. DOI: 10.36253/caryologia-1067.
- [7] Flavell, R. B. (2021) Perspective: 50 years of plant chromosome biology, *Plant Physiology*. <https://doi.org/10.1093/plphys/kiaa108>
- [8] Shakeel, R., Dar, T.U.H. (2023). Intraspecific karyotypic diversity: A case study of *Zea mays* L. from Pir Panjal Himalaya. *Journal of Stored Products Research*, 102, 102119. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2023.102119>